

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO



**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UNA PLANTA DE MINERÍA
DE CRIPTOMONEDAS FUNCIONANDO CON ENERGÍA
FOTOVOLTAICA**

PRESENTADO POR:

WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

MAESTRO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2026

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

MSc. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTOR:

MSc. ELMER ARTURO CARBALLO RUÍZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

MAESTRO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

Título:

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UNA PLANTA DE MINERÍA
DE CRIPTOMONEDAS FUNCIONANDO CON ENERGÍA
FOTOVOLTAICA**

Presentado por:

WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

MSc. ÁLVARO RENÉ FLAMENCO RAMOS

SAN SALVADOR, MAYO DE 2026

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

MSc. ÁLVARO RENÉ FLAMENCO RAMOS

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a todos aquellos que hicieron posible la realización de este estudio.

En primer lugar, a Jehová, por brindarme la fortaleza, la salud y la perseverancia necesarias para concluir exitosamente esta etapa de mi formación académica.

A la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, por proporcionar el entorno idóneo para la realización de este programa de maestría.

Al docente asesor, por su orientación, recomendaciones y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

A mis padres y a mi hermano, por su apoyo incondicional, comprensión y paciencia a lo largo de este proceso, constituyéndose en un pilar fundamental para alcanzar esta meta académica.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo y finalización de este estudio.

Walter Zelaya

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABLAS.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	2
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES DEL BITCOIN.....	3
1.1. Historia de las criptomonedas y Bitcoin.....	3
1.1.1. Antes de Bitcoin.....	5
1.1.2. Posicionamiento de Bitcoin como criptomoneda.....	6
1.2. El concepto de <i>wallet</i> y <i>exchange</i>	8
1.2.1. Primeras billeteras de Bitcoin.....	8
1.2.2. La evolución de las billeteras y las plataformas de intercambio.....	9
1.3. Operación de la red Bitcoin.....	10
1.3.1. Descentralización.....	10
1.3.2. La tecnología <i>blockchain</i>	11
1.3.3. Las transacciones con Bitcoin.....	12
1.3.4. La minería de Bitcoin.....	13
1.4. La fiebre del oro con Bitcoin: El oro digital del siglo XXI.....	17
1.5. Bitcoin en El Salvador.....	18
1.5.1. Aspectos legales.....	19
1.5.2. Chivo Wallet.....	21
1.6. Perspectivas y proyección de Bitcoin.....	23
CAPÍTULO 2. PROCESO DE MINERÍA DE CRIPTOMONEDAS.....	24
2.1. Fundamentos del proceso de minería.....	24
2.1.1. Criptografía, <i>nonce</i> y función <i>hash</i>	25
2.1.2. Árbol de Merkle.....	28
2.1.2. Dificultad de la red.....	29
2.1.3. Estructura básica de un bloque.....	31
2.2. Etapas del proceso de minería.....	32
2.2.1. Comparación con el proceso de moneda fiduciaria.....	33
2.2.2. Transacciones en Bitcoin.....	35

2.3. Infraestructura técnica para la minería.....	37
2.3.1. Hardware para la minería de Bitcoin	38
2.3.2. Software para la minería de Bitcoin.....	43
2.4. Pools de minería.....	45
2.4.1. Minería en solitario	47
2.4.2. Minería en grupo (<i>pools</i> de minería).....	48
2.5. Minería en El Salvador.....	50
2.6. Sostenibilidad y evolución de la minería de criptomonedas	53
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO ASOCIADO A LA MINERÍA DE BITCOIN	54
3.1. Evaluación del desempeño energético y térmico del equipo ASIC.....	54
3.1.1. Medición de potencia eléctrica consumida por el equipo ASIC.....	57
3.1.2. Mediciones térmicas del equipo ASIC.....	58
3.1.3. Mediciones registradas durante un período de 24 horas.....	59
3.1.4. Impacto de la temperatura ambiente en el rendimiento	62
3.2. Costo de la energía eléctrica para minar Bitcoin	64
3.2.1. Precio de la energía eléctrica en El Salvador.....	65
3.2.2. Precio de la energía eléctrica a nivel mundial.....	68
3.3. Países con mayor presencia en minería de criptomonedas.....	70
3.4. Evaluación de los costos operativos y energéticos del Antminer S19 Pro.....	73
3.4.1. Ingresos generados por la minería de Bitcoin.....	73
3.4.2. Análisis del consumo energético.....	75
3.4.3. Costos operativos adicionales a la energía	77
3.4.4. Comparación de eficiencia energética entre Antminer S19 Pro y Antminer S21 Pro.....	78
3.5. Desafíos de la minería de criptomonedas en El Salvador	81
3.5.1. Limitaciones de la matriz energética salvadoreña	81
3.5.2. Modelos estatales de minería y su sostenibilidad limitada	83
3.6. Implicaciones energéticas y necesidad de una alternativa de suministro.....	84
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE PLANTA FOTOVOLTAICA PARA OPERACIÓN DE MINERÍA DE BITCOIN	85
4.1. Antecedentes de la minería de Bitcoin en El Salvador con energías renovables.....	85
4.2. Potencial solar en El Salvador	88
4.2.1. Evolución de la potencia instalada de energía solar fotovoltaica en El Salvador	89
4.2.2. Horas sol pico e irradiancia	90
4.2.3. Potencia pico y energía generada	92

4.2.4. Factor de capacidad de sistemas fotovoltaicos	92
4.2.5. Indicadores de la energía solar fotovoltaica en América Latina	93
4.3. Elementos de un sistema fotovoltaico	94
4.3.1. Tipos de sistemas fotovoltaicos	95
4.3.2. Módulos fotovoltaicos (paneles solares)	96
4.3.3. Regulador de carga.....	97
4.3.4. Almacenamiento de energía	98
4.3.5. Inversores	99
4.4. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico	101
4.4.1. Ubicación geográfica del sitio de estudio	101
4.4.2. Determinación del consumo energético.....	102
4.4.3. Dimensionamiento del generador fotovoltaico	104
4.4.4. Selección de módulos fotovoltaicos.....	105
4.4.5. Dimensionamiento de inversores	106
4.4.6. Dimensionamiento de <i>strings</i> y banco de baterías.....	106
4.5. Estimación de costos del sistema solar fotovoltaico	109
4.5.1. Costos de inversión inicial (CAPEX)	110
4.5.2. Costos operativos anuales (OPEX).....	111
4.5.3. Costo Nivelado de Electricidad (LCOE).....	112
4.6. Evaluación financiera del proyecto de minería de Bitcoin.....	113
4.6.1. Indicadores del caso base – Bitcoin a US\$ 85,000	114
4.6.2. Indicadores del caso optimista – Bitcoin a US\$ 150,000.....	115
4.6.3. Período de recuperación descontado (<i>payback descontado</i>).....	116
4.6.4. Valor Presente Neto (VPN).....	118
4.6.5. Tasa Interna de Retorno (TIR)	119
4.7. Evaluación económica del sistema utilizando equipos Antminer S21 Pro.....	119
4.8. Conclusiones del análisis técnico-económico	122
CONCLUSIONES	123
RECOMENDACIONES	124
REFERENCIAS.....	125

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1-1. Porcentaje de capitalización de mercado de criptomonedas, para el 02/02/2025
- Figura 1-2. Datos de Google Finance del precio de Bitcoin, actualizado el 28/01/2025
- Figura 1-3. Comparación del modelo centralizado y descentralizado
- Figura 1-4. Una transacción a través de una red *blockchain*
- Figura 1-5. Una transacción a través de un banco como intermediario
- Figura 1-6. Infografía de cómo la *blockchain* impide que ocurra un doble gasto (Bitpanda,2019a)
- Figura 1-7. Historial de los eventos de *halving*
- Figura 1-8. “Un nuevo y magnífico clíper para San Francisco”
- Figura 1-9. Ubicación de cajeros de Chivo Wallet en El Salvador
- Figura 2-1. Aplicación de función hash a un texto
- Figura 2-2. Proceso de búsqueda del *nonce* correcto
- Figura 2-3. Árbol de Merkle de cuatro hojas
- Figura 2-4. Evolución de la *dificultad de la red* de Bitcoin entre mayo de 2024 y abril de 2025 (Blockchain, s.f.)
- Figura 2-5. Esquema de los componentes de un bloque en la *blockchain*
- Figura 2-6. Minería de Bitcoin: validación de transacciones y adición de bloques (Bitpanda, 2019b)
- Figura 2-7. Esquema de las etapas de una transacción en Bitcoin (Gomez, 2020)
- Figura 2-8. Fotografías de un ASIC Antminer S19 Pro (izquierda) y un ASIC WhatsMiner M30S (derecha)
- Figura 2-9. Rig de minería con 8 tarjetas gráficas NVIDIA RTX 3080
- Figura 2-10. Panel de control o dashboard de Braiins OS en el Antminer S19 Pro
- Figura 2-11. Participación de mercado de varios pools de minería en enero de 2025
- Figura 2-12. Estadística del desempeño de Braiins Pool
- Figura 2-13. Ventajas y desventajas de la minería en pools (CryptoMinerBros, 2024)
- Figura 2-14. Energía eléctrica suministrada a la red nacional durante 2024 (elaboración propia)
- Figura 2-15. Equipo minero instalado en la planta geotérmica de Berlín, Usulután (Agencia A.F.P., 2021)
- Figura 3-1. Consumo de energía eléctrica por la red Bitcoin en los últimos 5 años
- Figura 3-2. Comparación del consumo anual de electricidad de la red Bitcoin con algunos países (Roa, 2021)

Figura 3-3. (a) Conexión del Fluke 435 al sistema eléctrico del ASIC. (b) Vista de las mediciones registradas

Figura 3-4. (a) Vista térmica del Antminer S19 Pro. (b) Imagen térmica de los ventiladores y disipadores de calor, con una temperatura de 45.1 °C

Figura 3-5. Vista del Fluke 435 en funcionamiento para las mediciones

Figura 3-6. Valores de potencia activa más frecuente

Figura 3-7. Energía total consumida por el equipo ASIC durante 24 horas

Figura 3-8. Temperatura mínima registrada en los chips cerca de las 3:00 a. m.

Figura 3-9. Temperatura máxima registrada en los chips cerca de las 3:00 p. m.

Figura 3-10. Precios promedio anual del servicio eléctrico en Centroamérica, de 1998 a 2015

Figura 3-11. Distribución mundial de la minería de Bitcoin en 2024 (Miah, 2025)

Figura 3-12. Recompensa obtenida de la minería de Bitcoin durante un día completo

Figura 3-13. Estimación de ganancias con el Antminer S19 Pro (ASICMinerValue, s.f.)

Figura 3-14. Rentabilidad estimada para los Antminer S19 Pro y S21 Pro

Figura 3-15. Inyección energética por recurso en El Salvador, 2022 (InvestinElSalvador, 2023)

Figura 4-1. Representación conceptual de Volcano Energy (Rivera, 2023)

Figura 4-2. Promedio de 20 años de irradiación global horizontal en El Salvador (SolarGIS, s.f.-a)

Figura 4-3. Evolución de la potencia instalada en El Salvador (elaboración propia con datos de DGEHM, 2024)

Figura 4-4. Distribución de la irradiancia solar diaria y su equivalencia en horas sol pico

Figura 4-5. Carta solar de Santa Ana, en la zona de *Volcano Energy* y la planta El Ronco de Holcim

Figura 4-6. Costo total de instalación, Factor de Capacidad y Costo Nivelado de Electricidad fotovoltaica en América Latina y el Caribe (2010–2019)

Figura 4-7. Planta de generación solar fotovoltaica en El Salvador (Molina, 2024)

Figura 4-8. Tipos de células fotovoltaicas (Tritec Center, 2017)

Figura 4-9. Diagrama de un sistema fotovoltaico aislado (*off-grid*) con regulador de carga

Figura 4-10. Baterías de iones de litio para almacenamiento de energía fotovoltaica

Figura 4-11. Inversor solar en un sistema conectado a la red (*on-grid*)

Figura 4-12. Mapa de ubicación del sitio de diseño en Metapán, Santa Ana, El Salvador (OpenStreetMap, s.f.)

LISTA DE TABLAS

- Tabla 2.1. Comparación entre ASIC, rig de GPUs y una FPGA VCU1525
- Tabla 3-1. Pliego tarifario vigente de mayo a julio de 2025 para pequeñas demandas
- Tabla 3-2. Precio promedio de electricidad para hogares en 2024 (GlobalPetrolPrices.com, s.f.-b)
- Tabla 3-3. Cálculo de costos energéticos para pequeñas demandas
- Tabla 3-4. Pliego tarifario vigente de mayo a julio de 2025 para grandes demandas
- Tabla 3-5. Cálculo de costos energéticos para grandes demandas
- Tabla 3-6. Especificaciones técnicas de los equipos ASIC Antminer
- Tabla 3-7. Estimación de la rentabilidad mensual de los equipos ASIC (85,000 US\$/BTC)
- Tabla 3-8. Estimación de la rentabilidad mensual de los equipos ASIC (150,000 US\$/BTC)
- Tabla 4-1. Consumo energético diario y anual del sistema
- Tabla 4-2. Resultados del dimensionamiento del sistema fotovoltaico
- Tabla 4-3. Estimación de la inversión inicial (CAPEX) del sistema fotovoltaico
- Tabla 4-4. Estimación de los costos operativos anuales (OPEX) del sistema fotovoltaico
- Tabla 4-5. Flujo neto anual y período de recuperación simple (85,000 US\$/BTC)
- Tabla 4-6. Flujo neto anual y período de recuperación simple (150,000 US\$/BTC)
- Tabla 4-7. Flujo neto anual y valor presente (VP)
- Tabla 4-8. Comparación de indicadores financieros entre equipos Antminer S19 Pro y Antminer S21 Pro
- Tabla 4-9. Indicadores energéticos y financieros de los escenarios evaluados: LCOE, VPN y TIR

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las criptomonedas han adquirido relevancia a nivel mundial como medio de intercambio digital y activo de inversión. Estas operan bajo esquemas descentralizados que validan transacciones sin la intervención de una autoridad central. Entre ellas, Bitcoin se ha consolidado como la más representativa debido a su capitalización de mercado y rápida adopción global.

Bitcoin utiliza un algoritmo de consenso basado en prueba de trabajo, el cual exige a los participantes aportar alta potencia de cómputo para validar bloques y garantizar la seguridad de la red. En este esquema, la confiabilidad del sistema depende directamente de la capacidad de procesamiento instalada, lo que implica un consumo elevado y continuo de energía eléctrica.

La minería de Bitcoin, basada en la resolución de problemas criptográficos, permite a los participantes obtener recompensas económicas. Inicialmente, esta actividad se realizaba en computadoras personales, pero ha evolucionado hacia equipos especializados ASIC (*Application Specific Integrated Circuits*). A pesar de los avances en eficiencia, continúa siendo una actividad de alto consumo energético, lo que ha generado debate sobre su sostenibilidad y rentabilidad.

En El Salvador, la adopción de Bitcoin como moneda de curso legal en 2021 incrementó el interés en proyectos de minería. Sin embargo, factores como el costo de la energía eléctrica, las tarifas vigentes y las condiciones del sistema eléctrico nacional hacen necesario evaluar la viabilidad técnica y económica de esta actividad en el contexto local.

La presente investigación desarrolla un análisis aplicado a la realidad salvadoreña, incorporando mediciones reales del consumo energético de equipos ASIC en operación y evaluando el costo de la energía conforme al pliego tarifario nacional. Además, se realiza el dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico destinado a cubrir la demanda eléctrica de la operación minera.

Con base en estos elementos, se propone un generador fotovoltaico para el cual la inversión pueda financiarse con los ingresos generados por la minería de Bitcoin. Este planteamiento permite analizar el consumo eléctrico, el costo de la energía y los ingresos proyectados mediante indicadores financieros como el período de recuperación de la inversión, el Valor Presente Neto y la Tasa Interna de Retorno, con el fin de evaluar la viabilidad económica del sistema dentro de un horizonte de evaluación definido.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad técnica y económica de la operación de minería de Bitcoin en El Salvador mediante el suministro de energía a través de un sistema solar fotovoltaico, considerando los requerimientos eléctricos del proceso, los costos de inversión y operación, así como su desempeño financiero.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los fundamentos técnicos de la minería de Bitcoin y su relación con el consumo energético, describiendo el funcionamiento del algoritmo de consenso *Proof of Work* (PoW), así como la evolución tecnológica de los equipos utilizados en el proceso de minado.
- Cuantificar el consumo eléctrico de equipos ASIC en condiciones reales de operación y evaluar su impacto en los costos energéticos conforme al pliego tarifario del sistema eléctrico salvadoreño.
- Diseñar y dimensionar un sistema fotovoltaico capaz de cubrir la demanda energética de la operación minera y sus cargas auxiliares, considerando la potencia instalada del generador fotovoltaico, su configuración eléctrica y los parámetros de rendimiento y eficiencia del sistema.
- Determinar si los ingresos generados por la minería de Bitcoin permiten recuperar la inversión inicial y cubrir los costos de operación del sistema fotovoltaico, mediante el análisis de indicadores financieros como el período de recuperación, el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), bajo distintos escenarios de precio del Bitcoin.

CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES DEL BITCOIN

Bitcoin (BTC) es la primera criptomoneda del mundo, generada, utilizada y distribuida de manera electrónica. Funciona sobre una red descentralizada punto a punto (*peer-to-peer, P2P*), lo que significa que ninguna institución ni individuo controla su emisión, gasto ni reserva.

Desde su activación en enero de 2009, Bitcoin ha transformado la percepción del dinero y se ha presentado como una alternativa descentralizada y segura al sistema financiero tradicional. Sin embargo, el concepto de dinero digital ya había sido explorado previamente. En la década de 1990, proyectos como *DigiCash* y *E-gold* intentaron crear sistemas monetarios digitales basados en criptografía, pero fracasaron debido a problemas relacionados con la centralización y la regulación (Bech & Garratt, 2017).

1.1. Historia de las criptomonedas y Bitcoin

Todo empezó en 2008, cuando se registró el dominio Bitcoin.org. Entonces, alguien llamado Satoshi Nakamoto, que es el seudónimo de la persona o grupo de personas que crearon Bitcoin, publicó el 31 de octubre de ese mismo año un documento técnico conocido como el “whitepaper” (*el libro blanco*) titulado “*Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*”. Este documento es fundamental porque describe cómo funciona Bitcoin y presenta la idea de un sistema de dinero digital que permite transacciones directas entre usuarios sin necesidad de intermediarios, como los bancos (Domingo, 2018).

El *whitepaper* describe conceptos importantes, incluido la *blockchain*, la tecnología que sustenta y garantiza la seguridad y transparencia de las transacciones. También describe el proceso de *minería*, así como la forma en que se validan y registran las transacciones en la red. La publicación de este documento marcó el inicio de una revolución en el mundo financiero y tecnológico, dando lugar a un ecosistema de criptomonedas y tecnologías descentralizadas.

La palabra *blockchain* se traduce literalmente al español como “cadena de bloques”. Es una estructura de datos en la que la información se organiza en conjuntos denominados bloques. A cada bloque se le añaden metadatos que hacen referencia al bloque anterior, estableciendo así una secuencia cronológica. Gracias al uso de técnicas criptográficas, la información contenida en un bloque no puede

ser modificada sin alterar también todos los bloques que lo preceden, lo que garantiza la integridad y seguridad de la cadena.

En los primeros años de Bitcoin, el mundo atravesaba una de las peores crisis económicas desde la Gran Depresión de la década de 1930, lo que provocó que muchas personas comenzaran a buscar alternativas al sistema financiero tradicional. La crisis financiera de 2008 fue una de las peores recesiones económicas de la historia reciente. Comenzó en Estados Unidos y rápidamente se extendió a otras partes del mundo. La principal causa fue la *burbuja inmobiliaria*, donde los precios de las viviendas crecieron de manera insostenible, impulsados por la concesión de créditos hipotecarios a personas con baja capacidad de pago. Cuando esto sucedió, la gente no compraba los inmuebles para vivir en ellos, sino con la esperanza de que su valor siguiera aumentando.

Cuando la burbuja estalló, los precios de las viviendas cayeron rápidamente, dejando a los compradores con propiedades que tenían un valor muy inferior al que había pagado. Esto desató una reacción en cadena que provocó la quiebra de varias instituciones y generó una crisis mundial de confianza en los mercados financieros. Como resultado, muchas personas que lo habían perdido todo se desilusionaron de los bancos y otras entidades financieras, al sentir que estas carecían de transparencia y rendición de cuentas. Fue entonces cuando comenzó a crecer el interés por las monedas descentralizadas y por tecnologías capaces de ofrecer mayor seguridad y autonomía.

En ese momento, lo que la sociedad buscaba era proteger su dinero y tener un mayor control sobre sus finanzas. Por eso, muchas personas se sintieron atraídas por el concepto de una moneda que no estuviera respaldada por un banco central o un gobierno y cuyo valor no fuera determinado por una entidad específica, sino que dependiera únicamente de la oferta y la demanda del mercado. Esto fue evidente, cuando Elon Musk, a través de su fabricante de automóviles Tesla, informó en los primeros meses de 2021 la compra de US\$ 1,500 millones de Bitcoin. La noticia provocó un aumento del 17 % en el precio de la criptomoneda, elevando su valor a un récord de US\$ 44,220 por unidad (BBC, 2021).

Además de la desconfianza en el sistema financiero, otro atractivo de Bitcoin fue que muchos lo vieron como una “reserva de valor”, similar al oro, ya que la cantidad de unidades serían limitadas. En el caso de la compra de US\$ 1,500 millones de Bitcoin, Tesla dijo que la compra respondía a un intento por “*maximizar la rentabilidad del efectivo que no se utiliza en el funcionamiento diario de la empresa*”. Además, esta criptomoneda ha facilitado la inclusión financiera, permitiendo que la población sin acceso a servicios bancarios pueda participar en la economía global. También se ha incentivado la innovación en todo el panorama financiero, ya que ha llevado a los desarrolladores a trabajar en

aplicaciones y servicios que antes no existían, como las billeteras digitales o el uso de NFC (“Comunicación de Campo Cercano”, del inglés, *Near Field Communication*), disponible en la mayoría de los teléfonos celulares, para transacciones comerciales.

En resumen, el lanzamiento de Bitcoin en 2009 marcó un hito en la historia de las criptomonedas. A diferencia de sus predecesores, Bitcoin utilizaría la tecnología *blockchain* para resolver el problema del *doble gasto* y descentralizar el control de las transacciones. La *blockchain*, un *libro mayor distribuido* y transparente, permite que todas las transacciones sean verificadas por todos los nodos en la red sin la necesidad de un intermediario central. Esto aseguró la confianza en el sistema y fomentó su adopción. La Figura 1-1 muestra el porcentaje de capitalización de mercado de varias criptomonedas, donde Bitcoin ocupa el primer lugar y supera al segundo lugar por un amplio margen.



Figura 1-1. Porcentaje de capitalización de mercado de criptomonedas, para el 02/02/2025

1.1.1. Antes de Bitcoin

La historia del dinero se remonta a tiempos antiguos, cuando los romanos utilizaban monedas de metal, como el denario, para facilitar el comercio y las transacciones. Estas monedas tenían un valor intrínseco debido al metal con el que estaban hechas, como plata o bronce. Con el tiempo, las economías evolucionaron y surgió el concepto de *monedas fiduciarias*.

En el contexto de las criptomonedas, se entiende por “moneda fiduciaria” al dinero tradicional, es decir, el dinero no digital. El término *fiat*, que proviene del latín y significa “declaración” o “pronunciamiento”, indica que el valor del dinero fiduciario no es inherente a su material, sino que proviene de la autoridad

que lo emite. Por ejemplo, el papel en el que se imprime un billete de US\$ 1.00 es el mismo que se usa para un billete de US\$ 100.00; su valor no está en el papel, sino en que una autoridad central lo declara como tal.

En cuanto a la historia de las criptomonedas, su origen se remonta a las primeras ideas sobre monedas digitales descentralizadas a mediados de la década de 1980. En ese momento, David Chaum, considerado uno de los pioneros en criptografía, presentó en 1983 el concepto de “dinero ciego” (*blind money*), que permitía realizar transacciones privadas y anónimas mediante el uso de firmas digitales. Este concepto se volvió realidad en *DigiCash*, una empresa fundada en 1989 que desarrolló uno de los primeros sistemas de pago electrónico basado en criptografía. Aunque innovador, *DigiCash* cerró en 1998 debido a la falta de adopción masiva y problemas financieros (Moreno *et al.*, 2018).

Al mismo tiempo, otros sistemas intentaban crear monedas digitales. *E-gold*, lanzado en 1996, permitía a los usuarios realizar transacciones respaldadas por oro. Aunque el servicio fue popular al principio, tuvo algunos problemas regulatorios y cerró sus operaciones en 2009. Estos primeros esfuerzos, aunque fallaron, sentaron las bases para el desarrollo de Bitcoin al identificar las debilidades de los sistemas centralizados y destacar la necesidad de redes descentralizadas (Bech & Garratt, 2017).

1.1.2. Posicionamiento de Bitcoin como criptomoneda

El crecimiento de Bitcoin fue lento en sus primeros años. Por ejemplo, en 2010, la primera transacción comercial documentada que utilizó Bitcoin fue la compra de dos pizzas por 10,000 BTC, un evento que resalta la volatilidad y el valor inicial simbólico de esta criptomoneda. Sin embargo, para 2013, el precio de Bitcoin había alcanzado los US\$ 1,000, atrayendo la atención de inversores y desarrolladores. Este auge también llevó al surgimiento de *altcoins*, criptomonedas alternativas que buscaban mejorar aspectos específicos de Bitcoin, como velocidad de transacción, privacidad y eficiencia energética. El siguiente gráfico ilustra esa volatilidad del precio de un Bitcoin en dólares estadounidense (Schuschny, 2017).

Llama la atención en la Figura 1-2 que el primer gran aumento en el precio de Bitcoin se produjo cuando Tesla compró US\$ 1,500 millones de bitcoins a principios de 2021 y continuó subiendo en ese mismo año hasta alcanzar el precio de US\$ 61,190.87 el 13 de marzo. Meses después, alcanzó el precio récord de US\$ 64,402.50 el 13 de noviembre.

Varios sitios web especializados en Bitcoin sugieren que el aumento del precio de la criptomoneda en 2024, que alcanzó casi los US\$ 100,000 en noviembre de ese año, podría haber estado impulsado por las expectativas en torno a una posible victoria de Donald Trump en las elecciones presidenciales de Estados Unidos, previstas para noviembre de 2024 (Euronews, 2024).



Figura 1-2. Datos de *Google Finance* del precio de Bitcoin, actualizado el 28/01/2025

Hay criptomonedas que no han alcanzado la popularidad de Bitcoin, tal es el caso de *Ethereum*, introducida en 2015, pero que marcó un avance importante en el contexto de las criptomonedas al introducir *contratos inteligentes*. Estos son programas que se ejecutan en la *blockchain* y permiten automatizar acuerdos y procesos sin intermediarios. La capacidad de Ethereum para alojar aplicaciones descentralizadas (*DApps*) amplió considerablemente el alcance de las criptomonedas, facilitando el desarrollo de proyectos en sectores como finanzas, juegos y logística (Moreno *et al.*, 2018).

Con el tiempo, la adopción de criptomonedas se expandió más allá de su uso como medio de intercambio o reserva de valor. Instituciones financieras y empresas tecnológicas comenzaron a explorar su potencial. Por ejemplo, *Ripple* se enfocó en la transferencia internacional de dinero, mientras que *Monero* y *Zcash* se especializaron en privacidad. Además, el auge de las “Ofertas Iniciales de Monedas” (*Initial Coin Offering*, ICOs, por sus siglas en inglés) en 2017 demostró la capacidad de las criptomonedas para financiar proyectos innovadores, aunque también atrajo críticas por la proliferación de estafas (Navarro Cardoso, 2019).

En la década de 2020, el mercado de criptomonedas siguió creciendo exponencialmente y alcanzó una capitalización de mercado de billones de dólares. La adopción institucional se aceleró con empresas como Tesla y MicroStrategy que invirtieron en Bitcoin, mientras que países como El Salvador y la República Centroafricana declararon Bitcoin como moneda de curso legal, consolidando el papel de las criptomonedas en la economía global.

No obstante, este crecimiento también trajo retos significativos. La volatilidad extrema de los precios y las preocupaciones ambientales relacionadas con el consumo de energía de la *minería de criptomonedas* generaron debates sobre su sostenibilidad (Quintero *et al.*, 2022).

1.2. El concepto de *wallet* y *exchange*

Aunque la propuesta de Bitcoin era interesante, inicialmente carecía de los mecanismos prácticos necesarios para su uso y comercialización efectiva. Fue entonces cuando surgió la necesidad de billeteras (*wallets*) para almacenar y gestionar las criptomonedas, así como de plataformas de intercambio (*exchanges*) para facilitar la compra y venta de Bitcoin.

1.2.1. Primeras billeteras de Bitcoin

Las billeteras (*wallets*) de Bitcoin inicialmente eran simples archivos de texto y programas de código abierto que almacenaban las claves privadas necesarias para acceder a los fondos de Bitcoin. La primera billetera que permitió el almacenamiento de bitcoins fue el software creado por Satoshi Nakamoto en 2009, conocido como el *Bitcoin Core*. Este programa, también conocido como "*cliente de satoshi*", permitía a los usuarios generar direcciones y almacenar sus bitcoins localmente en sus computadoras.

El 12 de enero de 2009, Satoshi Nakamoto realizó la primera transacción de Bitcoin, enviando 10 BTC a Hal Finney, un programador que se convirtió en uno de los primeros colaboradores del proyecto. Este evento marcó el inicio del uso de Bitcoin en transacciones reales (Navarro Cardoso, 2019).

La primera aplicación o plataforma de intercambio (*exchange*) de Bitcoin no fue un sitio de compra y venta tradicional como se conocen hoy, sino una plataforma llamada *BitcoinMarket.com*, que abrió sus puertas en 2010. Este sitio, fundado por un programador llamado Jed McCaleb, permitió a los usuarios intercambiar Bitcoin por dólares estadounidenses. *BitcoinMarket.com* operaba de manera sencilla, estableciendo un precio de mercado inicial de US\$ 0.003 por cada bitcoin.

En ese momento, Bitcoin era prácticamente desconocido fuera de los círculos de entusiastas de las criptomonedas. Sin embargo, el comercio de Bitcoin en la primera plataforma de intercambio representó un avance clave para la criptomoneda, ya que proporcionó una vía para que cualquier persona pudiera comprar y vender el activo digital de manera fácil y segura.

En aquel entonces, *BitcoinMarket.com* seguía siendo un mercado pequeño y modesto, pero jugó un papel importante al permitir el primer intercambio de criptomonedas por cualquier *moneda fiduciaria*, así como al establecer el primer valor monetario para Bitcoin. Esta plataforma cerró en 2011 después de que los volúmenes de transacciones aumentaron y la volatilidad de los precios hizo que la gestión del intercambio fuera más complicada (Navarro Cardoso, 2019).

Tras el cierre de *BitcoinMarket.com*, comenzaron a surgir más plataformas de intercambio de Bitcoin, con el objetivo de satisfacer una creciente demanda. Entre las primeras plataformas de intercambio más importantes, estuvieron:

- **Mt. Gox (2010):** Fundada por Jed McCaleb y luego adquirida por Mark Karpeles, Mt. Gox fue la plataforma de intercambio de Bitcoin más grande en su época, manejando más del 70 % de las transacciones a nivel mundial. En 2014, colapsó debido a un hackeo masivo que resultó en la pérdida de aproximadamente 850,000 BTC, lo que dañó gravemente la reputación del ecosistema de criptomonedas.
- **BTC-e (2011):** Plataforma de intercambio rusa con servidores ubicados en Estados Unidos, que ganó popularidad rápidamente. En 2017, el gobierno estadounidense incautó su sitio web y fondos, acusándola de lavado de dinero y delitos cibernéticos, lo que resultó en su cierre y en la detención de uno de sus operadores.

1.2.2. La evolución de las billeteras y las plataformas de intercambio

Con el tiempo, las billeteras digitales y las plataformas de intercambio de Bitcoin se fueron transformando en aplicaciones más accesibles para cualquier persona interesada en utilizar criptomonedas. Ahora, existen múltiples soluciones que permiten tanto el almacenamiento como la transferencia segura de bitcoins.

Existen principalmente dos tipos de billeteras: las *billeteras calientes*, que están conectadas a Internet y son más fáciles de usar, pero también más vulnerables a hackeos y las *billeteras frías*, que no están conectadas a Internet y ofrecen mayor seguridad, siendo ideales para quienes desean almacenar

criptomonedas a largo plazo. Entre las *billeteras calientes*, aplicaciones como *Coinbase Wallet* o *Trust Wallet* son muy populares, mientras que las billeteras frías, como *Ledger* o *Trezor*, son recomendadas para el almacenamiento seguro de grandes cantidades.

De igual manera, también se tienen varias opciones de plataformas de intercambio de Bitcoin. Por ejemplo, existen *plataformas centralizadas*, como *Binance* y *Coinbase*, que facilitan las transacciones, pero requieren que los usuarios confíen en la entidad o empresa que gestiona las operaciones y custodia los fondos. Estas plataformas suelen ser más fáciles de usar para principiantes. Las *plataformas descentralizadas*, como *Uniswap*, no requieren intermediarios, lo que otorga mayor control a los usuarios sobre sus fondos, aunque su uso puede ser más complejo. Ambas opciones tienen sus pros y contras, dependiendo de las necesidades y el nivel de seguridad que busque cada usuario.

Sin embargo, esta primera etapa de estas aplicaciones estuvo marcada por vulnerabilidades de seguridad, problemas regulatorios y una falta de infraestructura. A pesar de ello, el impacto en la evolución del ecosistema de Bitcoin fue significativo, porque demostraron que la criptomoneda podía operar como un activo comercializable y almacenable, lo que sentó las bases para la explosión de la industria de las criptomonedas en la siguiente década (Bitcoin, s.f.).

1.3. Operación de la red Bitcoin

Como se mencionó previamente, Bitcoin es una criptomoneda que opera de manera descentralizada, sin depender de una autoridad central como un banco o gobierno. Esto se logra gracias a su tecnología basada en la *blockchain* (cadena de bloques), que garantiza su funcionamiento como una moneda digital segura, transparente y resistente a la censura. Para comprender cómo funciona Bitcoin, es fundamental analizar sus principales componentes: el registro en la *blockchain*, las transacciones, la minería y el proceso de validación de bloques.

1.3.1. Descentralización

El principal beneficio de una criptomoneda descentralizada es que proporciona una mayor autonomía al usuario, protege contra la inflación y puede ser más difícil de manipular o censurar por gobiernos o entidades centralizadas. En lugar de una entidad central, la red Bitcoin funciona a través de un sistema distribuido y descentralizado de *nodos* que trabajan juntos para mantener la seguridad y la integridad

de la red. Para ello, la red Bitcoin hace uso de *blockchain*, que funciona como una base de datos digital compartida entre todos los *nodos*, donde se lleva el registro de todas las transacciones verificadas.

En un sistema descentralizado como Bitcoin, cualquier usuario puede acceder y descargar una copia completa del historial de transacciones registradas en la *blockchain* desde el primer bloque de la red, conocido como el *bloque génesis*. Este registro incluye todas las transacciones confirmadas y verificadas como válidas por la red, lo que garantiza que la información es transparente y accesible para todos. A diferencia de los sistemas centralizados, donde el acceso a los datos está restringido, en Bitcoin cualquier persona puede consultar y verificar el historial completo de transacciones. En la Figura 1-3, se hace una comparación de los dos modelos.

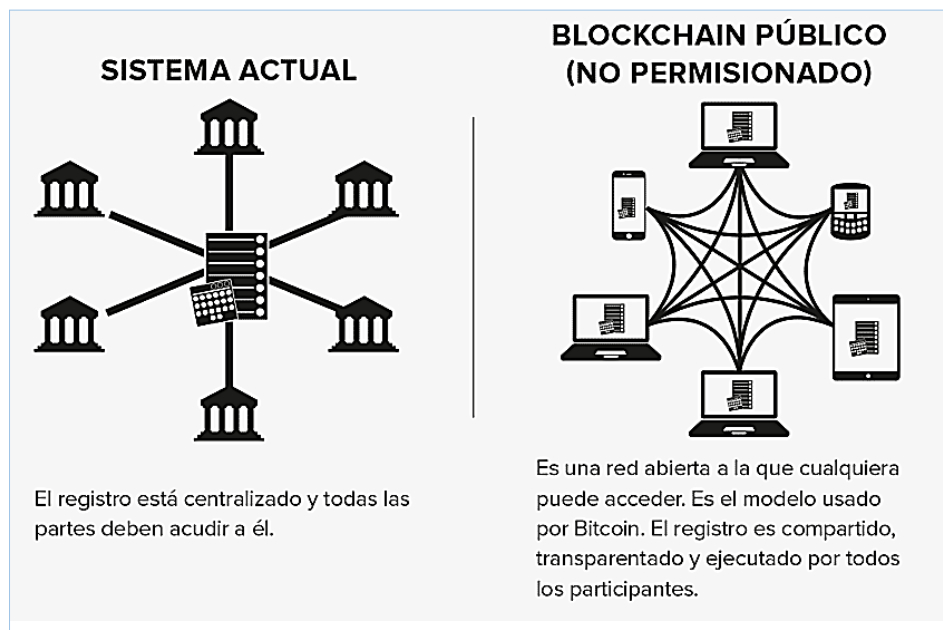


Figura 1-3. Comparación del modelo centralizado y descentralizado

1.3.2. La tecnología *blockchain*

La *blockchain* es el núcleo de la red Bitcoin, un registro público y distribuido que almacena todas las transacciones realizadas con esta criptomoneda. Cada vez que un usuario efectúa una transacción, esta se agrupa con otras en un bloque. Los bloques se enlazan cronológicamente, formando una secuencia continua que da origen al nombre “cadena de bloques”. Esta estructura permite crear un registro histórico e inmutable de todas las transacciones realizadas en la red, que comenzó en enero de 2009.

Las criptomonedas son una forma de dinero digital que emplea la criptografía para asegurar sus transacciones. Según Schuschny (2017), la *blockchain*, la tecnología que respalda a las criptomonedas funciona como un *libro mayor distribuido* que registra todas las transacciones de manera transparente e inmutable. Esta tecnología opera mediante una red descentralizada de equipos de cómputo que validan y registran las transacciones sin la necesidad de intermediarios tradicionales.

1.3.3. Las transacciones con Bitcoin

Las transacciones con Bitcoin implican el intercambio de criptomonedas entre usuarios. Para llevar a cabo una transacción, cada usuario necesita una *clave pública* y una *clave privada*. La clave pública funciona como una dirección única para recibir Bitcoin (similar a un número de cuenta bancaria o nombre de usuario), mientras que la clave privada se usa para firmar digitalmente la transacción, asegurando que solo el propietario de los fondos pueda autorizar su gasto (similar a una contraseña).

Cuando un usuario realiza una transacción, esta se envía a la red Bitcoin. Los *nodos* de la red validan la transacción, comprobando que el emisor tiene fondos suficientes y que la transacción no se haya realizado previamente, evitando así el *doble gasto*. Una vez validada, la transacción se agrupa en un bloque junto con otras transacciones y se añade a la *blockchain*. En la Figura 1-4 se ilustran el funcionamiento de un sistema descentralizado.

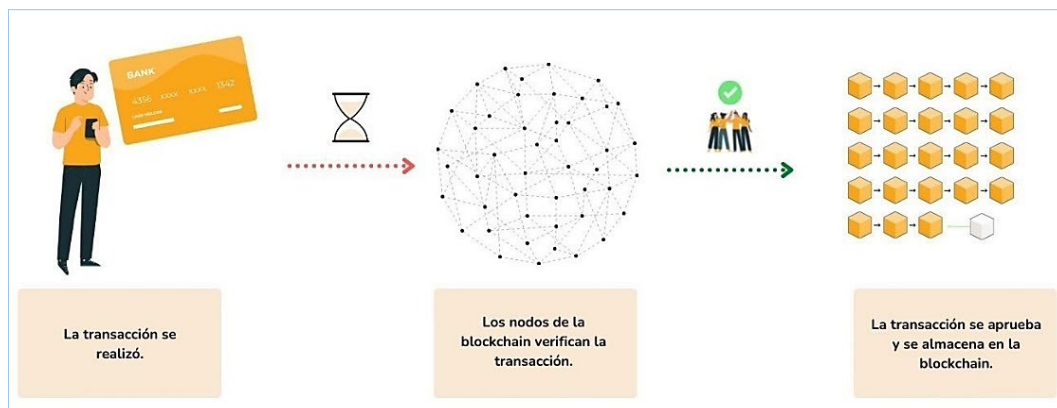


Figura 1-4. Una transacción a través de una red *blockchain*

Un concepto clave en el ecosistema de Bitcoin es el *doble gasto*, que hace referencia al riesgo inherente a los sistemas digitales de pagos, donde el mismo valor podría gastarse más de una vez simultáneamente. En el caso de Bitcoin y otras criptomonedas, la *blockchain* actúa como una solución

para prevenir este problema, garantizando que las transacciones sean únicas, seguras e irreversibles. La *blockchain* ofrece un registro descentralizado y distribuido de todas las transacciones, lo que hace extremadamente difícil modificar el historial de transacciones pasadas.

Por ejemplo, un atacante podría intentar enviar la misma cantidad de bitcoins a dos personas diferentes (en transacciones simultáneas), con la esperanza de que una de ellas sea confirmada antes que la otra, permitiendo que los mismos bitcoins sean “gastados” dos veces. Sin embargo, la *blockchain* actúa como la estructura robusta que garantiza la integridad de las transacciones. Para llevar a cabo un *ataque de doble gasto* exitoso, un atacante necesitaría controlar más del 50 % de la potencia de cómputo de la red (lo que se conoce como un *ataque del 51 %*), algo que resulta extremadamente difícil y costoso debido a la alta seguridad y la distribución de la minería en la red.

En un sistema tradicional de pagos, como el de tarjetas de crédito o dinero en efectivo, una entidad central (como un banco o institución financiera) valida y asegura que los fondos no se gasten más de una vez. Sin embargo, en un sistema descentralizado como Bitcoin, no existe una autoridad central que controle las transacciones. En su lugar, los nodos y los mineros trabajan de forma colaborativa para garantizar la integridad de las transacciones y prevenir el doble gasto. En la Figura 1-5, se ilustran el funcionamiento de un sistema centralizado.



Figura 1-5. Una transacción a través de un banco como intermediario

1.3.4. La minería de Bitcoin

Así como en la minería para la extracción de minerales existen muchas técnicas, en la “minería de criptomonedas” ocurre algo similar. En el caso de la red Bitcoin, como la primera y más conocida criptomoneda, utiliza un *algoritmo de consenso* denominado “Prueba de Trabajo” (*Proof of Work*,

PoW). Novas Carballo (2023) explica que este mecanismo requiere que los *mineros* resuelvan problemas matemáticos complejos para validar las transacciones y agregar nuevos bloques a la cadena, recibiendo como recompensa nuevas unidades de la criptomoneda.

Cabe aclarar que, en el contexto de la minería de Bitcoin, el término “minero” puede referirse tanto a la persona propietaria del equipo de cómputo como al dispositivo especializado utilizado para llevar a cabo el proceso de minería.

Algoritmo de consenso

Un algoritmo de consenso es un conjunto de reglas y procesos que permiten a varias entidades, como nodos en una red distribuida, llegar a un acuerdo común sobre el estado de un sistema sin necesidad de una autoridad central. Estos algoritmos son fundamentales para garantizar la coherencia, seguridad e integridad de los datos en sistemas descentralizados, como las criptomonedas. La Figura 1-6 muestra cómo la *blockchain* impide el doble gasto.

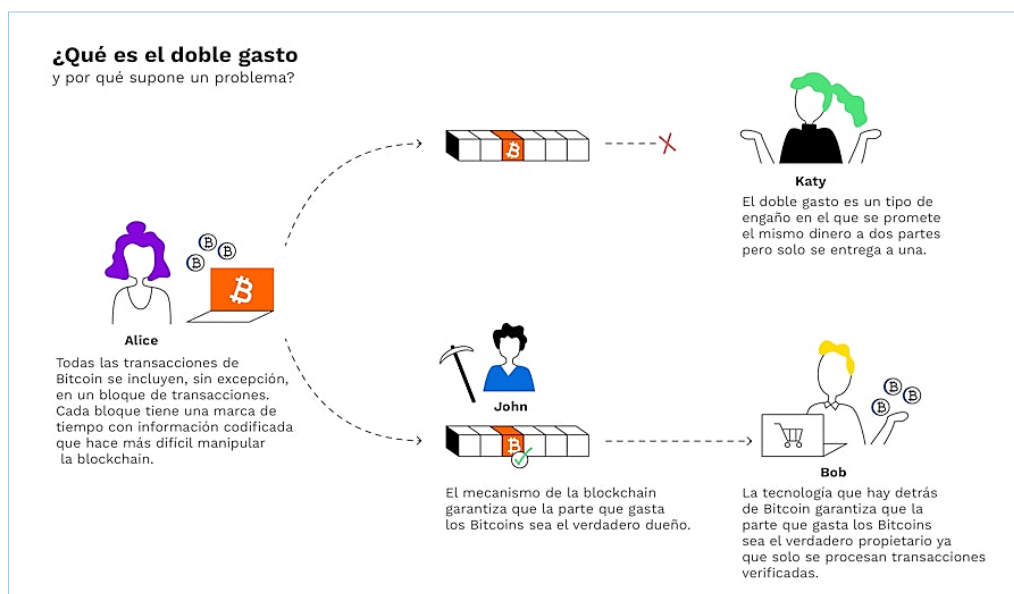


Figura 1-6. Infografía de cómo la *blockchain* impide que ocurra un *doble gasto* (Bitpanda,2019a)

Los algoritmos de consenso aseguran que todas las partes involucradas, a pesar de no tener un control centralizado, puedan ponerse de acuerdo sobre la validez de las transacciones o los datos registrados. Por esta razón, se dice que la única manera de modificar el historial de una *blockchain* es a través de

un *ataque del 51 %* que permite al atacante gastar monedas que ya han sido gastadas previamente (lo que se conoce como *doble gasto*).

En un escenario hipotético de *ataque del 51 %*, el atacante toma el control de la *blockchain* al obtener la mayoría de la *tasa de hash* de la red (es decir, la potencia de cómputo necesaria para generar nuevos bloques). Esto le permitiría modificar el historial de transacciones, como revertir transacciones ya confirmadas o utilizar monedas que ya han sido gastadas.

A pesar de esta posibilidad, llevar a cabo un ataque de esta magnitud es extremadamente difícil y costoso. Se requeriría una enorme cantidad de dinero para adquirir equipos de minería de alta gama y una gran cantidad de energía eléctrica para operar estos equipos. Además, no es económicamente viable, ya que un ataque exitoso probablemente provocaría una caída en el precio de la criptomoneda atacada, haciendo que el ataque sea financieramente insostenible (Bitcoin Store, s.f.).

Minería y *halving* en Bitcoin

La minería es el proceso mediante el cual se validan las transacciones de Bitcoin y se crean nuevas unidades. En el sistema de esta criptomoneda, la minería es una forma de consenso que asegura que las transacciones sean procesadas de manera justa y eficiente. El primer minero que resuelve el algoritmo valida un bloque de transacciones y lo añade a la *blockchain*. Como recompensa por su trabajo, el minero recibe una cantidad de nuevos bitcoins, lo que se conoce como *recompensa por bloque*.

Este proceso no solo garantiza la integridad de las transacciones, sino que también genera nuevos bitcoins. La recompensa otorgada por cada bloque disminuye de manera programada a lo largo del tiempo, en un evento denominado *halving* (reducción a la mitad de la recompensa). Este evento ocurre aproximadamente cada 210,000 bloques, lo que equivale a un intervalo cercano a los cuatro años. Desde el lanzamiento de Bitcoin en 2009, la recompensa por minería se ha reducido en cuatro ocasiones: en 2012, 2016, 2020 y 2024.

Como se muestra en la Figura 1-7, el primer *halving*, en noviembre de 2012, redujo la recompensa por minar un bloque de 50 a 25 BTC. Los siguientes *halvings* ocurrieron en julio de 2016 (12.5 BTC), mayo de 2020 (6.25 BTC) y abril de 2024 (3.125 BTC). El próximo *halving*, en marzo de 2028, reducirá la recompensa a 1.5625 BTC. Estos eventos son clave para mantener la escasez de Bitcoin y controlar la

inflación, asegurando que el suministro total no supere los 21 millones de bitcoins, lo que refuerza sus principios deflacionistas (Binance, 2024).

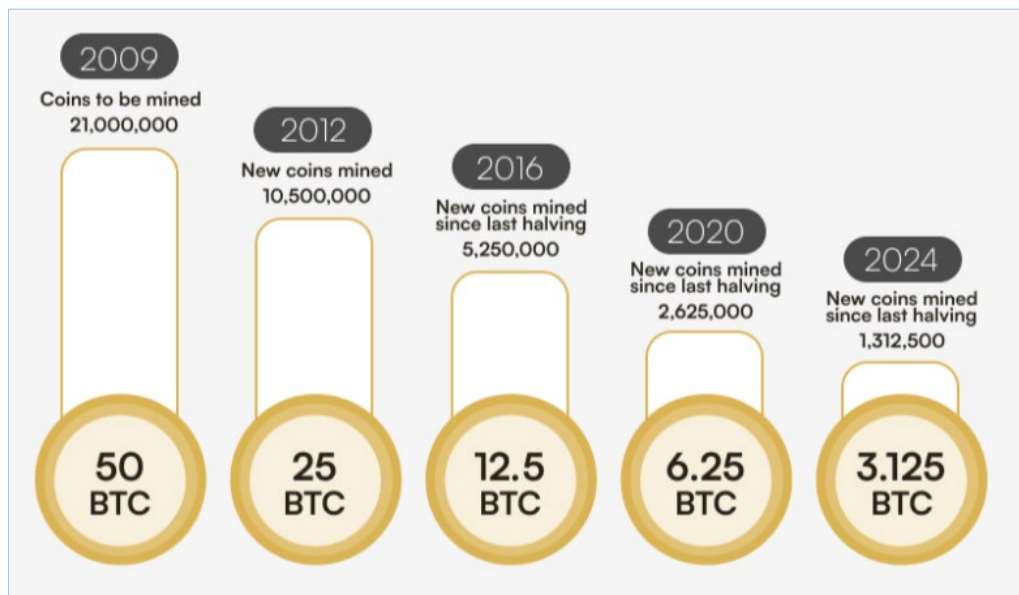


Figura 1-7. Historial de los eventos de *halving*

A diferencia de las *monedas fiduciarias*, que pueden ser emitidas sin límite por los bancos centrales, Bitcoin tiene un suministro máximo de 21 millones de unidades. Hasta el último *halving* en abril de 2024, se habían minado aproximadamente 19,687,500 bitcoins, lo que representa más del 93 % de su suministro total. Este límite forma parte del diseño intrínseco de la criptomoneda, y se estima que la última moneda será minada alrededor del año 2140. Esta escasez programada ha llevado a muchos a considerar a Bitcoin como un *refugio de valor*, similar al oro.

Validación de bloques

La validación de bloques es crucial en la red Bitcoin, ya que asegura que las transacciones en la *blockchain* sean legítimas y cumplan con las reglas del protocolo. Este proceso es realizado por los *nodos*, equipos de cómputo distribuidos que verifican las transacciones en los bloques propuestos por los *mineros*, quienes compiten por agregar nuevos bloques a la cadena mediante la resolución de problemas matemáticos complejos, utilizando el mecanismo de *Prueba de Trabajo (PoW)*.

Los *nodos* validan aspectos claves como la prevención del *doble gasto*, asegurándose de que una transacción no se haya registrado previamente y de que el emisor tenga suficientes fondos disponibles.

Además, verifican que las transacciones cumplan con las reglas del protocolo, tales como la validez de las firmas digitales y la coherencia entre los bitcoins enviados y recibidos, entre otras restricciones.

La seguridad de la red depende de la potencia de cómputo de los *mineros*, ya que son ellos quienes validan los bloques y mantienen el consenso. Este modelo descentralizado hace que Bitcoin sea antifraude y más resistente a fallos en comparación con redes centralizadas, ya que, si un nodo falla, el resto sigue operando, garantizando una alta disponibilidad (Nakamoto, 2008).

1.4. La fiebre del oro con Bitcoin: El oro digital del siglo XXI

La fiebre del oro se considera uno de los eventos más notorios en la historia económica, caracterizada por la era de la exploración y la especulación. En los siglos XIX y XX, miles de personas dejaron sus hogares para encontrar oro en nuevos lugares como California, Australia y Sudáfrica. En este escenario, el oro no solo era considerado un bien valioso por su belleza y utilidad, sino también como una reserva de valor que podía proteger contra la inflación y la inestabilidad económica. En la actualidad, el auge de Bitcoin ha generado comparaciones similares con la fiebre del oro, aunque en un entorno completamente diferente: el mundo digital y financiero moderno. La Figura 1-8 muestra una publicidad del siglo XIX en Nueva York, donde se ofrece transporte en una embarcación a vela (*clipper*) para viajar a las minas de California.

Al igual que el oro, Bitcoin posee ciertas características que lo convierten en un activo de refugio seguro en tiempos de crisis financiera. Su escasez es uno de sus principales atractivos, lo que lo hace un *activo deflacionario*, similar al oro. Esto ha llevado a muchos inversionistas a considerarlo como “oro digital”, capaz de proteger su valor frente a la inflación y la devaluación de las *monedas fiduciarias*. La creciente demanda de Bitcoin, especialmente a raíz de emergencias internacionales como la pandemia de COVID-19, ha provocado un aumento en su valor, similar a cómo los precios del oro tienden a subir durante períodos de incertidumbre financiera (MUNDIARIO, 2024).

La especulación es otro punto en común entre ambas “fiebres”. Al igual que en la fiebre del oro, cuando miles de personas invadieron territorios desconocidos en busca de riquezas, hoy, la inversión en Bitcoin atrae tanto a inversionistas institucionales como a pequeños especuladores. A pesar de que Bitcoin ha demostrado ser un activo de alto riesgo debido a su volatilidad, muchos lo consideran una oportunidad para obtener rendimientos elevados, en especial cuando su precio experimenta aumentos rápidos. No

obstante, al igual que en la fiebre del oro donde no todos los participantes se enriquecieron, la especulación en Bitcoin también conlleva grandes riesgos.



Figura 1-8. “Un nuevo y magnífico clíper para San Francisco”
Anuncio de viajes a California publicado en Nueva York en la década de 1850

La fiebre del oro y la fiebre de Bitcoin comparten muchas similitudes en cuanto a la búsqueda de seguridad financiera, la escasez como un atributo de valor y la especulación masiva que genera burbujas económicas. Si bien, el futuro de Bitcoin sigue siendo incierto, su creciente aceptación como activo de refugio seguro lo convierte en el “oro digital” del siglo XXI.

1.5. Bitcoin en El Salvador

El 7 de septiembre de 2021, El Salvador se convirtió oficialmente en el primer país del mundo en adoptar el Bitcoin como moneda de curso legal, esta iniciativa fue impulsada y comunicada directamente por el presidente Nayib Bukele en la *Conferencia Latinoamericana de Bitcoin y blockchain 2021*, celebrada en Miami entre el 4 y 5 de junio (INFOBAE, 2021).

La implementación del Bitcoin como moneda de curso legal, tenía tres objetivos fundamentales:

- Primero, una reducción significativa en el costo de transferencia de remesas que ingresan a El Salvador cada año. Según el Banco Central de Reserva (BCR), las remesas familiares sumaron US\$ 8,181 millones al cierre de 2023, lo que representa un 24 % del Producto Interno Bruto (PIB) (Banco Central de Reserva, 2022).
- En segundo lugar, impulsar la inclusión financiera. Para noviembre de 2024, cifras oficiales destacan que sólo el 28 % de la población posee una cuenta bancaria en El Salvador. La intención del Estado era corregir estos datos impulsando la Ley Bitcoin.
- Finalmente, el uso de Bitcoin como medio de pago. Esto significaría una mejora en las finanzas del Estado al reducir el costo de importación de dólares físicos. Cabe mencionar que cuando un país necesita importar dólares físicos para hacerlos circular en su economía, tiene que pagar un costo asociado a diversos factores, como seguros, transporte o costos de transacción, entre otros (El Economista, 2022).

1.5.1. Aspectos legales

El decreto 57 emitido en junio de 2021 establece las bases para el uso del Bitcoin como moneda de curso legal. Este decreto enumeraba una serie de puntos, entre los que se encuentran los siguientes:

1. El Bitcoin puede utilizarse para cualquier transacción incluyendo el pago de impuestos y todos los agentes económicos deben aceptar el mismo como forma de pago.
2. El tipo de cambio entre el Bitcoin y el dólar es establecido por el mercado.
3. Los intercambios en Bitcoin no estarán sujetos a impuestos sobre las ganancias de capital, al igual que cualquier otra moneda de curso legal.
4. Quedan excluidos de la ley quienes no tengan acceso a las tecnologías que permitan ejecutar la transacciones en Bitcoin y el Estado toma la responsabilidad de promover los mecanismos necesarios.

La ley también contemplaba la creación de un fideicomiso de US\$ 150 millones en el Banco de Desarrollo de la República de El Salvador (BANDESAL), con el objetivo de garantizar la convertibilidad automática e instantánea de Bitcoin a dólares, no solo a través de entidades privadas, sino también

mediante entidades públicas, y financiar proyectos para fomentar el uso de Bitcoin entre la población (Banco Central de Reserva, 2022).

Un aspecto bastante importante de la ley es que reserva a las autoridades ciertas facultades de intervención que les permiten acceder a toda la información que tengan terceros en la cadena de valor en relación con operaciones realizadas, siempre y cuando la información sea solicitada por medio de una orden judicial. Es decir, pueden obtener información de las operaciones de los usuarios, como la dirección de Bitcoin utilizada en las operaciones, cajeros y en las billeteras.

Eliminación de la Ley Bitcoin

Como noticia de última hora, mientras se escribía esta tesis, el pasado 29 de enero de 2025, ocurrió algo inesperado. El Salvador eliminó el estatus de moneda de curso legal del Bitcoin, a menos de cuatro años de ser el primer país en adoptarlo. La Ley Bitcoin en El Salvador era la principal apuesta económica del presidente Bukele; sin embargo, la falta de transparencia en la compra del activo, la volatilidad de la criptomoneda y la situación económica del país, llevaron a que fuera rechazada por la mayoría de la población.

La Ley Bitcoin, aprobada en junio de 2021, sufrió modificaciones en seis artículos y la eliminación de otros tres. Ahora, el activo ya no es considerado moneda oficial; su uso queda relegado a intercambios entre ciudadanos y empresas privadas y su aceptación pasa de obligatoria a voluntaria.

Claramente, reconocer el Bitcoin como moneda oficial fue una acción inédita en el mundo cuando la ley entró en vigor en septiembre de 2021. Según El Faro (2025), también fue una de las principales objeciones del Fondo Monetario Internacional (FMI) con quien El Salvador buscaba un acuerdo desde 2021. Ese acuerdo se anunció en diciembre de 2024, el FMI impuso como requisito que “la aceptación de Bitcoin de parte del sector privado fuera voluntaria” y “limitar la participación del sector público en actividades relacionadas con Bitcoin”.

En definitiva, el gobierno de El Salvador se apresuró a oficializar el Bitcoin como moneda de curso legal. Tres días después del anuncio, la propuesta fue presentada ante la Asamblea Legislativa y su aprobación apenas tomó cinco horas. Sin embargo, las explicaciones sobre la breve ley de dos páginas, en lugar de darse en la comisión legislativa o en el pleno, se ofrecieron en un chat virtual en *Twitter* (ahora *X*), donde participaron el presidente Bukele y dos de sus hermanos, quienes se dirigieron en inglés a un grupo de inversionistas extranjeros (El Faro, 2025).

Curiosamente, para dejar sin efecto (o derogar) la mayor parte de esta ley, la Asamblea Legislativa tampoco se tomó mucho tiempo. Según El Faro (2025), todo el procedimiento duró solo doce minutos y medio. Entre los artículos modificados estaba el número 7, que regulaba la obligatoriedad de aceptar Bitcoin. El artículo original establecía que “todo agente económico deberá aceptar Bitcoin como forma de pago”. El artículo modificado ahora señala que solo las personas naturales o las empresas privadas “podrán aceptar bitcoin como forma de pago cuando así le sea ofrecido”.

1.5.2. Chivo Wallet

Como parte del impulso para promover la inclusión financiera, en septiembre de 2021 se lanzó *Chivo Wallet*, una billetera digital aprobada por el Estado y financiada por BANDESAL. Esta plataforma permitía a los usuarios enviar y recibir remesas, realizar pagos y convertir bitcoins a dólares, o viceversa, sin cargos adicionales. Cabe destacar que tanto la descarga como el uso de la aplicación fueron completamente gratuitos para los usuarios (Jurisprudencia, s.f.).

La iniciativa tenía como objetivo ofrecer una alternativa sin comisiones para el envío de remesas, especialmente desde Estados Unidos, uno de los principales países emisores hacia El Salvador. Las remesas representan aproximadamente el 24 % del Producto Interno Bruto (PIB) de El Salvador, destacando su importancia como fuente primaria de ingresos para muchas familias y su impacto directo en la estabilidad económica del país.

Para registrarse en *Chivo Wallet*, los usuarios debían contar con un número de DUI o pasaporte salvadoreño, incluso si estos documentos estaban vencidos, con el fin de fomentar el envío de remesas desde la diáspora salvadoreña. Actualmente, la red de *Chivo Wallet* incluye 55 cajeros automáticos en diversas ciudades de Estados Unidos, lo que facilita el envío de remesas. Además, en El Salvador se han instalado más de 200 cajeros automáticos, que permiten a los usuarios realizar depósitos y retiros de dólares en sus cuentas de Bitcoin de manera gratuita.

Para depositar efectivo, los usuarios pueden acudir a cualquiera de los cajeros automáticos de Chivo en El Salvador o realizar la operación en línea a través de la página web www.chivowallet.com, utilizando una tarjeta de crédito o débito. En la Figura 1-9 se presenta un mapa con la ubicación de estos cajeros en el país (Chivo Wallet, s.f.).



Figura 1-9. Ubicación de cajeros de Chivo Wallet en El Salvador

Reestructuración de *Chivo Wallet*

Para sorpresa de muchos, en diciembre de 2024, tras un importante gasto público destinado al lanzamiento de *Chivo Wallet* y la instalación de cajeros automáticos, el gobierno de El Salvador anunció que la billetera digital sería desactivada o vendida. A pesar de su diseño para facilitar transacciones con criptomonedas y el envío de remesas, la aplicación enfrentó serios problemas técnicos, incluyendo fallas operativas y dificultades para verificar a los usuarios.

La adopción de Bitcoin para el envío de remesas, a pesar de los esfuerzos gubernamentales, fue limitada. Según datos del Banco Central de Reservas (BCR), solo el 1.35 % de las remesas recibidas entre 2021 y 2024 se realizaron a través de billeteras digitales. Un estudio del *Inter-American Dialogue* reveló que, aunque el 61 % de los salvadoreños en Estados Unidos conocían el Bitcoin, solo el 7 % lo utilizó para remesas y todos los usuarios que lo hicieron reportaron experiencias negativas (Ortiz, 2024).

A pesar de los incentivos iniciales, como el bono de US\$ 30.00 en Bitcoin para los usuarios registrados, *Chivo Wallet* no logró la aceptación esperada. En los últimos meses de 2024, y con el objetivo de cumplir con los requerimientos del Fondo Monetario Internacional (FMI), el gobierno presentó “reformas legales” para el ecosistema Bitcoin en El Salvador. Según el FMI, “*la participación del gobierno en la billetera cripto (Chivo) se irá reduciendo gradualmente*”.

Luego de conocerse el acuerdo preliminar entre el FMI y El Salvador, la estadounidense Stacy Herbert, directora de la Oficina Nacional de Bitcoin, afirmó en un mensaje en *Twitter* (ahora *X*) que “*la billetera Chivo se venderá o se discontinuará, pero las numerosas billeteras de bitcoins del sector privado seguirán prestando servicios a El Salvador*”, sin revelar más detalles ni un comunicado oficial en alguna página web del Estado (Stacy Herbert, 2024).

1.6. Perspectivas y proyección de Bitcoin

Desde su activación en 2009 por Satoshi Nakamoto, Bitcoin ha pasado de ser un experimento criptográfico a un activo digital con impacto en los mercados internacionales. Su infraestructura basada en *blockchain* ha demostrado ser un sistema eficiente de validación descentralizada, garantizando integridad, trazabilidad y resistencia a la manipulación. No obstante, su comportamiento continúa marcado por alta volatilidad y por la influencia de factores económicos y regulatorios.

Su crecimiento también ha generado debates relevantes sobre escalabilidad, estabilidad de precio e impacto energético. El algoritmo de consenso Prueba de Trabajo (*Proof of Work, PoW*) exige elevada capacidad de cómputo para resolver funciones hash, lo que implica consumo significativo de energía y uso de hardware especializado. Esta característica ha intensificado las discusiones sobre sostenibilidad y eficiencia operativa en el largo plazo.

En consecuencia, la evolución futura de Bitcoin dependerá de mejoras tecnológicas en la minería, mayor eficiencia energética y marcos regulatorios más definidos. El equilibrio entre seguridad, descentralización y sostenibilidad será determinante para su consolidación a largo plazo. Por ello, el siguiente capítulo analiza en detalle el proceso de minería, la validación de bloques y el mecanismo de emisión controlada que sustentan la red.

CAPÍTULO 2. PROCESO DE MINERÍA DE CRIPTOMONEDAS

En el capítulo anterior se introdujo brevemente el concepto de minería de criptomonedas, en este capítulo se profundizará en los aspectos clave que componen este proceso, desglosando sus etapas fundamentales y la tecnología subyacente. La minería es el mecanismo central a través del cual se valida y confirma las transacciones de criptomonedas como Bitcoin, al mismo tiempo que se emiten nuevas unidades de la moneda. Este proceso es esencial para el funcionamiento de la red *blockchain*, ya que actúa como un consenso descentralizado, asegurando la integridad, la seguridad y la eficiencia en el registro de las transacciones.

En términos sencillos, el proceso de minería consiste en que los “mineros” resuelvan complejos problemas matemáticos para validar bloques de transacciones. El primer minero en encontrar la solución añade dicho bloque a la *blockchain* y, como recompensa por su trabajo, recibe una cantidad determinada de nuevos bitcoins, conocida como *la recompensa por bloque*.

2.1. Fundamentos del proceso de minería

En la red Bitcoin, diversos actores con funciones claramente diferenciadas colaboran para asegurar la integridad y seguridad de las transacciones. Los *nodos completos* desempeñan un papel crucial al validar las transacciones y garantizar el funcionamiento del *libro mayor descentralizado*, conocido como *blockchain*. Estos *nodos* almacenan una copia completa del historial de transacciones y verifican que cada nuevo bloque cumpla con las reglas establecidas por el protocolo.

Por otro lado, los mineros compiten para resolver problemas matemáticos complejos, añadiendo nuevos bloques a la cadena y asegurando el consenso de la red a cambio de una recompensa económica. Además de los nodos completos y los mineros, participan los *nodos ligeros*, que no almacenan toda la *blockchain*, y los *usuarios* que envían y reciben pagos, contribuyendo todos ellos a la eficiencia y seguridad del sistema; juntos, estos actores descentralizados permiten el funcionamiento de Bitcoin sin necesidad de una autoridad central (Nakamoto, 2008).

2.1.1. Criptografía, *nonce* y función *hash*

El término criptomoneda se refiere a una forma de dinero digital que usa *criptografía* para asegurar y verificar las transacciones, operando como una moneda descentralizada; es decir, las transacciones son *peer-to-peer* (punto a punto), entre el emisor y el receptor de la transacción.

La criptografía es una disciplina dentro de las matemáticas y la informática dedicada al estudio y aplicación de técnicas para proteger la información y las comunicaciones, garantizando su confidencialidad, integridad, irrenunciabilidad y autenticidad. Usa algoritmos que procesan los datos de modo que sólo las partes que poseen las claves correctas puedan acceder o modificarlos.

Es por eso que la criptografía es vital para la seguridad informática y juega un papel fundamental en tecnologías como las transacciones bancarias en línea, mensajería segura y en criptomonedas. Algunos de los métodos más conocidos son el *cifrado simétrico* (donde se usa una sola clave para cifrar y descifrar), el *cifrado asimétrico* (que usa un par de claves, una pública y una privada) y las firmas digitales (Antonopoulos, 2017).

En criptografía, también se emplea un *nonce* (abreviatura en inglés de *number used once*, es decir, “número usado una vez”), un valor aleatorio utilizado solo una vez en operaciones criptográficas. Esta herramienta es clave para garantizar la seguridad en procesos como la autenticación, el cifrado y la minería de criptomonedas, así como para asegurar la integridad de las transacciones en la *blockchain*.

En el contexto de la minería de Bitcoin, utilizando el algoritmo de “Prueba de Trabajo” (*Proof of Work, PoW*), los mineros realizan un proceso similar al de resolver un rompecabezas. En lugar de buscar piezas físicas, intentan encontrar el *nonce* adecuado, un número que modifican y prueban repetidamente junto con el bloque de transacciones. Cada vez que alteran el *nonce*, se genera un nuevo *hash* que debe cumplir con las condiciones específicas establecidas por la red.

Este proceso de minería implica una serie de intentos, donde cada *nonce* probado actúa como una pieza diferente de un rompecabezas. Los mineros continúan hasta encontrar la pieza que encaja, generando así el *hash válido*. Solo cuando encuentran el *nonce* correcto, pueden validar el bloque y añadirlo a la *blockchain*.

Otro elemento fundamental en el contexto de las criptomonedas es la *función hash*. Se trata de un algoritmo que toma datos de cualquier longitud y los transforma en una salida de tamaño fijo, conocida como *valor hash* o simplemente *hash*. El propósito de esta función es generar un identificador único para los datos de entrada, de modo que un pequeño cambio en la información original produzca una

salida completamente diferente. Este comportamiento garantiza la integridad de los datos, ya que incluso un mínimo ajuste en los datos de entrada resultará en un *hash* completamente distinto.

La *tasa de hash (hashrate)* es una medida de la potencia de cómputo que tiene un sistema o dispositivo para realizar cálculos de *funciones hash* en un periodo de tiempo determinado. Específicamente, en el contexto de la minería de criptomonedas, la *tasa de hash* indica la capacidad de un minero para procesar y resolver los problemas criptográficos complejos requeridos para validar transacciones y agregar bloques a la *blockchain*.

Las *funciones hash* son fundamentales en la criptografía y se utilizan en diversas aplicaciones, como el almacenamiento seguro de contraseñas, la verificación de la integridad de los datos y la creación de firmas digitales. Un atributo clave de estas funciones es su naturaleza *unidireccional*, lo que significa que el proceso no puede revertirse; es decir, es prácticamente imposible recuperar los datos originales a partir de un *valor hash*. Esto se ilustra en la Figura 2-1, donde una entrada de texto se transforma en un *hash*.

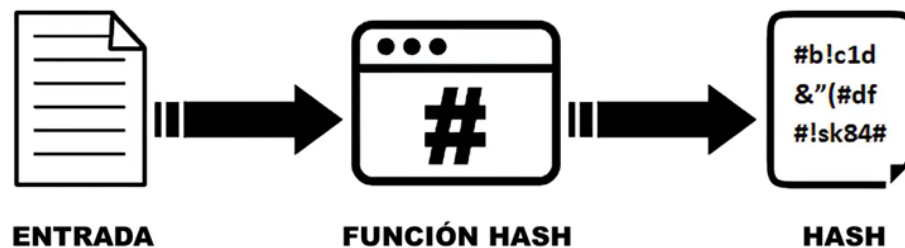


Figura 2-1. Aplicación de función hash a un texto

Existen varios tipos de *funciones hash*, que se diferencian por el nivel de encriptación en bit:

- **SHA-3 (2015):** Basado en el algoritmo criptográfico Keccak, ofrece un diseño totalmente nuevo y más resistente a ataques futuros. Es una alternativa moderna a SHA-2, aunque no lo reemplaza directamente.
- **SHA-2 (2001):** Familia de algoritmos (SHA-256, SHA-512, etc.) más seguros que SHA-1. Aún se considera confiable y se usa ampliamente en seguridad digital y criptomonedas.
- **SHA-1 (1995):** Muy usado en la web hasta que se descubrieron colisiones. Fue declarado inseguro en 2017 y ya no se recomienda para protección criptográfica.

- **SHA-0 (1993):** Primera versión oficial, retirada poco después por fallos de seguridad. No llegó a adoptarse ampliamente.
- **MD5 (1992):** Precursor de SHA. Popular en los 90, pero vulnerable a colisiones. Hoy solo se usa en contextos no críticos.

Un ejemplo de uso de una *función hash* sería el siguiente: si se tiene un conjunto de datos simple, como la cadena de caracteres “Hola”, y se aplica SHA-256, el resultado será un *hash* único y fijo:

- Entrada: “Hola”
- Salida: e633f4fc79badea1dc5db970cf397c8248bac47cc3acf9915ba60b5d76b0e88f

Este es el *hash* resultante. Si se cambia la entrada, incluso por un solo carácter, el hash cambiará por completo. Por ejemplo, si la entrada fuera “HOLA” (todo en mayúsculas), el *hash* resultante sería completamente diferente.

De hecho, la minería de Bitcoin utiliza el algoritmo SHA-256 (“Algoritmo de Hash Seguro de 256 bits”, del inglés, *Secure Hash Algorithm 256-bit*). Este algoritmo toma los datos de los bloques que contienen transacciones y les asigna un valor fijo de 256 bits, asegurando que ninguna otra entrada genere el mismo valor de salida. Los mineros buscan un valor de *nonce*, que ajustan repetidamente hasta que, al combinarse con el resto de los datos del bloque, cumple con los requisitos de dificultad establecidos por la red, generando un *hash válido*. Debido a que este proceso demanda una gran cantidad de potencia de cómputo, la minería se convierte en una actividad altamente competitiva.

Cada vez que un minero resuelve el desafío criptográfico, el *nonce* correcto encontrado permite añadir un nuevo bloque de transacciones a la *blockchain*. A cambio de este trabajo, el minero recibe una recompensa en nuevos bitcoins, así como las *comisiones por transacción* pagadas por aquellos que desean que sus operaciones sean incluidas en el siguiente bloque. Actualmente, la recompensa por cada bloque minado es de 3.125 BTC (Bitcoin Magazine, 2022).

Debido a las características de las *funciones hash*, los mineros no pueden predecir un *nonce* válido, por lo que deben emplear un enfoque de prueba y error. Ajustan el *nonce* de forma iterativa hasta generar un *hash* que cumpla con los requisitos de *dificultad de la red*, lo que generalmente implica que el *hash* comience con un número específico de ceros. A medida que aumenta la cantidad de ceros requeridos, la dificultad para encontrar un *nonce* válido también se incrementa. Este proceso, que exige una

considerable potencia de cómputo, es la base del algoritmo de *Prueba de Trabajo (PoW)*. Por eso, el término “trabajo” en *PoW* hace referencia al esfuerzo computacional necesario para generar un *hash* que cumpla con los requisitos establecidos por la red. Este proceso se ilustra en la Figura 2-2, donde el diagrama de flujo muestra cómo los mineros, mediante múltiples iteraciones, logran encontrar el *nonce* correcto (Bonneau *et al.*, 2015).

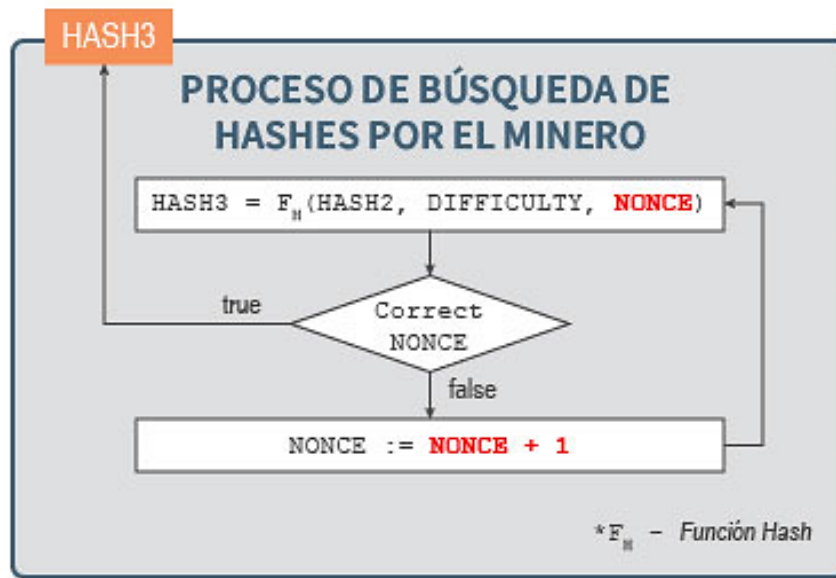


Figura 2-2. Proceso de búsqueda del *nonce* correcto

2.1.2. Árbol de Merkle

Un *árbol de Merkle*, llamado así por su creador Ralph Merkle, es una estructura de datos en forma de árbol binario donde cada *hoja* representa el hash de un conjunto de datos (una transacción individual) y cada *nodo interno* contiene el hash resultante de la concatenación de los hashes de sus nodos hijos. Esta estructura facilita la organización y verificación eficiente de grandes volúmenes de transacciones, garantizando la integridad y consistencia de los datos sin necesidad de validar cada transacción de manera individual. El objetivo principal de un *árbol de Merkle* es generar la “raíz de Merkle” (*Merkle Root*), que es un único valor *hash* que representa de manera compacta y verificable todas las transacciones dentro de un bloque.

La cadena de bloques o *blockchain* almacena una cantidad creciente de datos a medida que se incorporan nuevos bloques, lo que provoca un aumento continuo de su tamaño. Para permitir un acceso eficiente a esta enorme cantidad de información, es crucial contar con un mecanismo que

facilite la verificación de los datos sin necesidad de descargar toda la cadena. De ahí que la *blockchain* utiliza un *árbol de Merkle* para organizar y verificar las transacciones de manera eficiente, garantizando la integridad de la información sin afectar el rendimiento del sistema (Antonopoulos, 2017).

Este árbol permite representar de manera compacta y verificable todas las transacciones de un bloque, como se ilustra en la Figura 2-3. En el caso de cuatro transacciones, cada una genera un hash único (H_1 , H_2 , H_3 , H_4). Estos hashes se combinan en pares (H_1H_2 , H_3H_4) para generar nuevos hashes (H_{12} , H_{34}), hasta llegar a un único *hash final* conocido como la *raíz de Merkle*. En este ejemplo, H_1 y H_2 son nodos hijos de H_{12} . Al organizar las transacciones en una estructura jerárquica de hashes, el *árbol de Merkle* facilita la verificación de datos.

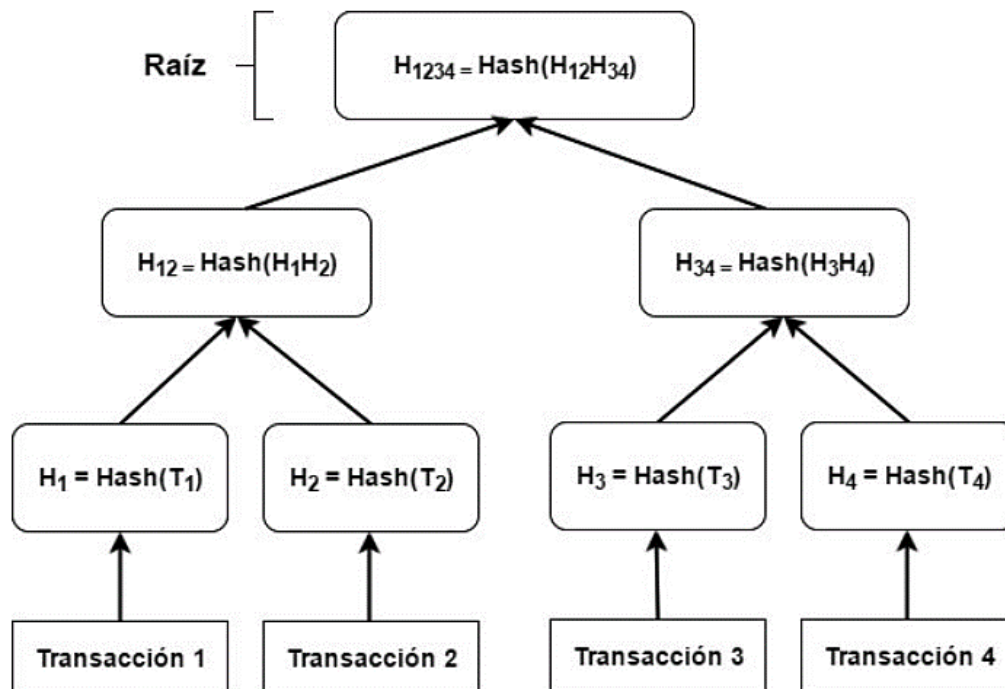


Figura 2-3. Árbol de Merkle de cuatro hojas

2.1.2. Dificultad de la red

Cuando Satoshi Nakamoto diseñó el protocolo de Bitcoin, estableció que el tiempo promedio para minar un bloque debería ser de 10 minutos. Esto implica que los mineros deben encontrar el *nonce* adecuado dentro de este intervalo para agregar un bloque a la *blockchain*; de lo contrario, la potencia de cómputo utilizada no sería usada con eficiencia. Para asegurar que esta tasa de minería se mantenga constante, el protocolo incluye un mecanismo de ajuste automático de la *dificultad* que se activa cada

dos semanas. Si los bloques se minan más lentamente de lo esperado, la dificultad disminuye, facilitando el proceso; en cambio, si se minan más rápido, la dificultad aumenta, lo que hace más difícil para los mineros encontrar el siguiente bloque (Nakamoto, 2008).

El ajuste de *dificultad* en la red de Bitcoin regula la complejidad del *problema criptográfico* que los mineros deben resolver para validar un bloque. Este ajuste se logra mediante la modificación de los requisitos del *hash*, como el número de ceros iniciales que debe contener el *hash de salida*. A medida que la dificultad aumenta, se requiere que el *hash* comience con más ceros, lo que hace que encontrar un *nonce* válido sea más complicado. Por el contrario, si la dificultad disminuye, se requiere menos ceros y los mineros pueden encontrar un *nonce* con más facilidad.

De este modo, el mecanismo asegura que un bloque se siga minando aproximadamente cada 10 minutos, independientemente del número de mineros en la red. Si más mineros participan, la *dificultad* aumenta; si hay menos mineros, la *dificultad* disminuye. Este ajuste contribuye a la estabilidad de la red, manteniendo constante el tiempo de validación de los bloques. Además, favorece la ocurrencia de los eventos de *halving*, los cuales, como se explicó anteriormente, tienen lugar tras minar 210,000 bloques (210,000 x 10 minutos = 2,100,000 minutos o alrededor de cuatro años).

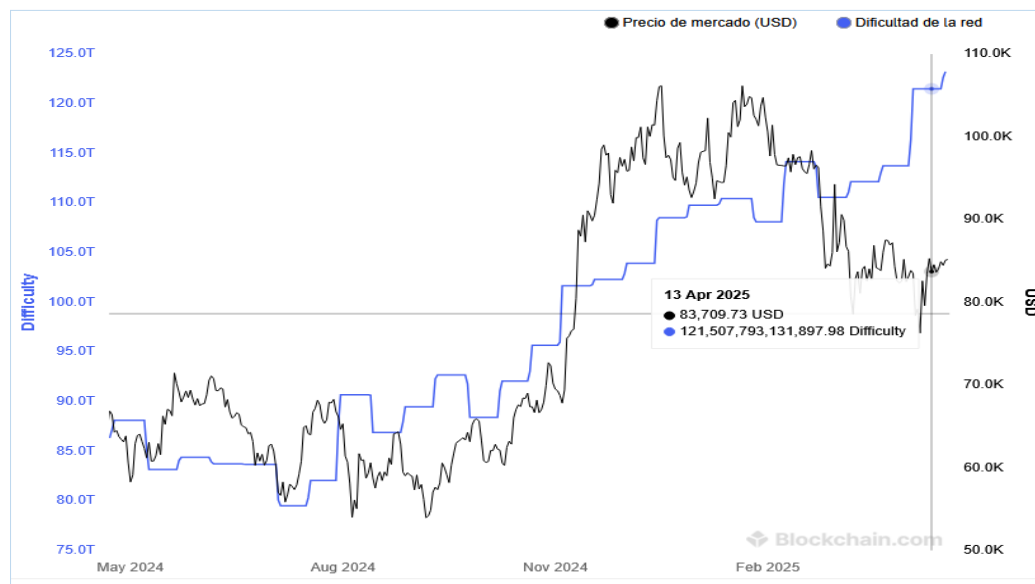


Figura 2-4. Evolución de la *dificultad de la red* de Bitcoin entre mayo de 2024 y abril de 2025 (Blockchain, s.f.)

La Figura 2-4 muestra el aumento de la *dificultad* en el último año. En mayo de 2024, la dificultad era de 86.0×10^{12} (86.0 T), mientras que en abril de 2025 alcanzó los 121.5×10^{12} (121.5 T). Aunque la dificultad no posee unidades específicas, puede interpretarse como un indicador del nivel de

complejidad para encontrar un hash válido, es decir, cuanto mayor es la dificultad, más difícil resulta para los mineros hallar un hash que cumpla con los requisitos exigidos por la red.

2.1.3. Estructura básica de un bloque

Un bloque de Bitcoin está compuesto por varios elementos clave: el *hash* del bloque anterior, que lo vincula a la cadena de bloques; la *raíz de Merkle*, que representa todas las transacciones del bloque; la marca de tiempo (*timestamp*), que indica cuándo fue creado; el nivel de dificultad de la *Prueba de Trabajo (PoW)*; un *nonce*, utilizado para encontrar un *hash* válido; y las transacciones, que contienen los detalles de las operaciones realizadas. Esta estructura garantiza la seguridad, integridad y validez de las transacciones dentro de la *blockchain* (Antonopoulos, 2017).

Los componentes clave del encabezado de un bloque en la *blockchain* son esenciales para su identificación y para vincularlo con el bloque anterior, garantizando así la integridad y continuidad de la cadena. A continuación, se describen los principales componentes, los cuales también se ilustran en la Figura 2-5.

- **Previous Block Hash** (*Hash del bloque anterior*): Este es un hash del encabezado del bloque anterior. Este enlace asegura que los bloques estén conectados en una “secuencia” en la blockchain. Si alguien intenta modificar un bloque anterior, el hash cambiará, rompiendo la cadena y haciendo evidente el intento de fraude.
- **Merkle Root** (*Raíz de Merkle*): Es el *hash raíz* del “árbol de Merkle”, que es utilizado para verificar de manera eficiente la integridad de las transacciones dentro del bloque. El *Merkle Tree* permite que los nodos de la red verifiquen que una transacción está incluida en un bloque sin tener que descargar todo el bloque.
- **Timestamp**: Es la *marca de tiempo* del bloque, que indica cuándo se ha creado o minado el bloque. Generalmente se utiliza para saber cuándo ocurrió un evento específico dentro de la *blockchain*.
- **Nonce**: El *nonce* es un número que los mineros ajustan durante la minería para encontrar un *hash* válido que cumpla con los requisitos de *dificultad* establecidos por la red.

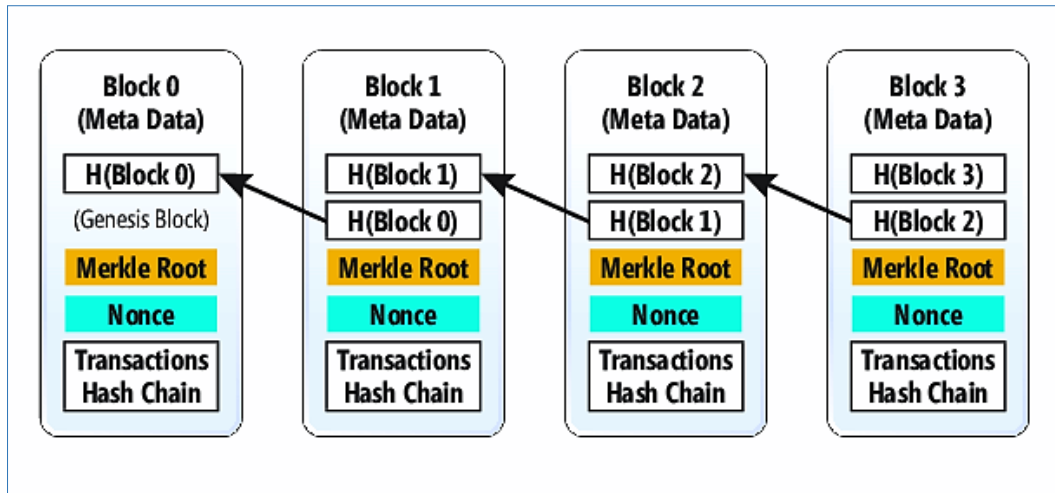


Figura 2-5. Esquema de los componentes de un bloque en la *blockchain*

2.2. Etapas del proceso de minería

La minería de Bitcoin va más allá de la simple creación de nuevas monedas; constituye la base que sostiene la red, al validar y asegurar cada transacción registrada en la cadena de bloques. Este proceso involucra a mineros de todo el mundo que utilizan hardware especializado para resolver complejos problemas criptográficos. Al encontrar una solución válida, un minero tiene la posibilidad de añadir un nuevo bloque de transacciones a la *blockchain* y recibir una recompensa en bitcoins. Este sistema no solo incentiva la participación de los mineros, sino que también refuerza la integridad y descentralización de la red, consolidando a la *blockchain* como una tecnología clave en el ecosistema de las criptomonedas.

En una transacción de Bitcoin, el emisor (quien envía los fondos) firma digitalmente un mensaje utilizando su clave privada, lo que garantiza la autenticidad de la operación. Este mensaje contiene información esencial, como el monto transferido, la dirección del receptor y una comisión para incentivar a los mineros a incluir la transacción en el siguiente bloque (D-Central Technologies, 2023).

El proceso de validación comienza cuando la transacción es transmitida a la red de nodos de Bitcoin. Estos nodos verifican que el emisor posea fondos suficientes y que la firma digital coincida con la clave pública asociada a la dirección de origen. Además, se aseguran de que los fondos no hayan sido gastados previamente, lo que previene el problema del “doble gasto”. Una vez validada, la transacción se difunde a los mineros, quienes compiten por incluirla en el siguiente bloque mediante el algoritmo de consenso, que en este caso es la *Prueba de Trabajo (PoW)*. Cuando un bloque es minado

exitosamente e incorporado a la *blockchain*, la transacción contenida en dicho bloque se considera confirmada.

La seguridad y la transparencia son elementos fundamentales en el sistema de transacciones de Bitcoin. La *blockchain* impide que se modifiquen registros pasados y su carácter descentralizado elimina la necesidad de una autoridad central, reduciendo significativamente el riesgo de fraude. Aunque las transacciones son pseudoanónimas, ya que las direcciones no están directamente vinculadas a identidades reales, toda la información queda registrada públicamente en la *blockchain*. Esto permite rastrear los fondos, aunque identificar a una persona específica requiere datos adicionales fuera de la red.

La Figura 2-6 ilustra el proceso de minería de Bitcoin, en el que los mineros validan transacciones resolviendo problemas criptográficos para añadir nuevos bloques a la *blockchain*, garantizando así la seguridad e integridad de la red.

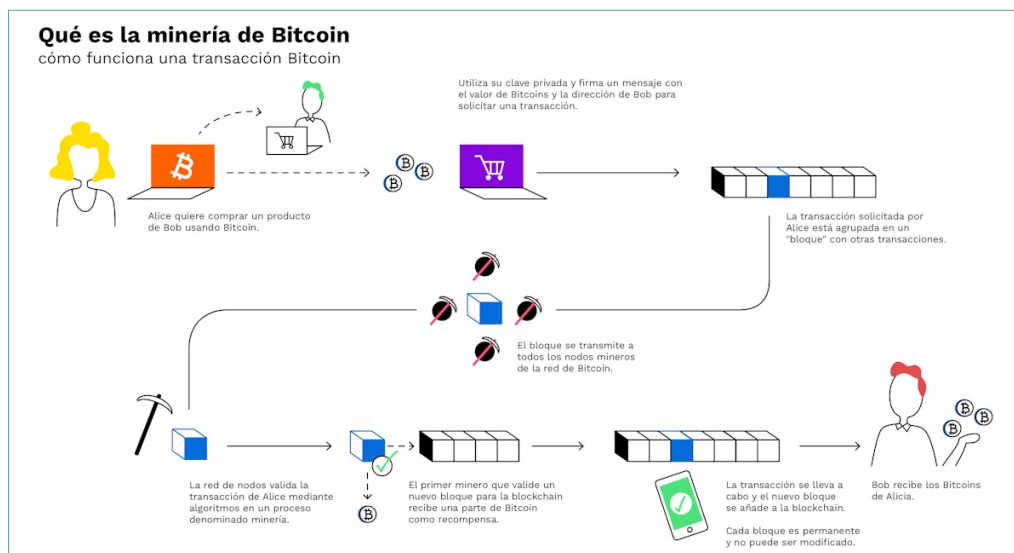


Figura 2-6. Minería de Bitcoin: validación de transacciones y adición de bloques (Bitpanda, 2019b)

2.2.1. Comparación con el proceso de moneda fiduciaria

Para comprender mejor cómo se lleva a cabo una transacción con criptomonedas, es útil compararla con el sistema financiero tradicional. Por ejemplo, cuando una persona emite un cheque para pagar un bien o servicio, el destinatario lo deposita en su entidad financiera. Si ambos tienen cuentas en la misma institución, solo es necesario debitar la cuenta del emisor y acreditar la del receptor. En este proceso, la única modificación en los registros es la actualización de dos entradas en el *libro mayor*. No es

necesario que un empleado retire físicamente el dinero de una caja fuerte para transferirlo al receptor. La contabilidad basada en un *libro mayor* fue una innovación fundamental que facilitó el intercambio de fondos en el sistema tradicional.

En el ecosistema de Bitcoin, el equivalente a un cheque bancario es una transacción registrada en la *blockchain*. Los usuarios realizan transacciones de manera similar a cómo se emitiría un cheque: especifican la cantidad a transferir y luego firman la transacción. Sin embargo, en lugar de firmar un cheque que podría ser falsificado, en Bitcoin se utiliza una firma digital basada en criptografía para validar la operación. Esta firma se genera mediante una clave privada, que solo conoce el propietario de los bitcoins. Así, el emisor puede firmar digitalmente la transacción, demostrando que controla los bitcoins que está enviando, sin necesidad de compartir su clave privada.

La red Bitcoin permite a los usuarios almacenar sus bitcoins en billeteras digitales (*wallets*). Cada segundo, miles de transacciones se inician desde billeteras de todo el mundo. Sin embargo, dado que no existe una autoridad central que gestione los pagos, la red opera de manera descentralizada. En este contexto, los mineros de todo el mundo compiten para validar y registrar las transacciones en un *libro mayor distribuido*, garantizando la integridad de la red sin la necesidad de intermediarios. Para lograrlo, los mineros emplean potentes equipos informáticos que resuelven complejos problemas criptográficos. Aproximadamente cada 10 minutos, aunque con variaciones, un minero resuelve un desafío criptográfico, agrupa las transacciones pendientes en un bloque y lo envía a la red para su validación (Kriptomat, 2025).

Cada bloque en la *blockchain* de Bitcoin funciona como una “página” en un *libro mayor distribuido*. Los *nodos completos* de la red son responsables de verificar la validez de las transacciones dentro de cada bloque. Cualquiera puede operar un nodo completo, lo que permite la participación de miles de usuarios en la validación constante de la red. Cuando un minero propone un nuevo bloque y este es aceptado por la red, recibe una recompensa de 3.125 bitcoins, cifra que se reducirá a la mitad en el próximo evento de *halving*. Una vez validado, el bloque y las transacciones que contiene se integran de forma permanente al historial de la *blockchain*. Actualmente, una transacción típica se confirma en menos de una hora en la *blockchain*, aunque el tiempo exacto puede variar según la congestión de la red y la prioridad de la transacción (Croman *et al.*, 2016).

2.2.2. Transacciones en Bitcoin

Una transacción de Bitcoin pasa por varias etapas antes de ser validada por los nodos y añadida a la *blockchain*. A continuación, se detallan las etapas principales del proceso (Antonopoulos, 2017):

1. Creación de la transacción

El proceso comienza cuando el emisor (quien envía los bitcoins) crea la transacción, la cual incluye los siguientes elementos esenciales:

- **Dirección del receptor:** Es la dirección de la billetera digital del destinatario, a la que se enviarán los bitcoins.
- **Monto a enviar:** Es el valor exacto de los bitcoins que se transferirán del emisor al receptor.
- **Tarifa de transacción:** El emisor incluye una tarifa que paga a los mineros para que incluyan la transacción en un bloque. Las tarifas son variables y pueden influir en la rapidez con la que se procesa la transacción.
- **Firma digital:** El emisor autentica la transacción firmándola con su clave privada, lo que garantiza que es el propietario legítimo de los bitcoins que está enviando.

Además, cada transacción en Bitcoin se basa en las “Salidas de Transacción no Gastadas”, conocidas como UTXO (*Unspent Transaction Outputs*). Estas representan el saldo disponible y actúan como entradas en nuevas transacciones, permitiendo verificar que el emisor posee los fondos necesarios para realizar el pago.

2. Propagación de la transacción en la red

Una vez creada, la transacción se envía a la red Bitcoin. Los nodos de la red reciben la transacción y la propagan entre ellos. En esta etapa inicial, los nodos no validan la transacción completamente, sino que simplemente la difunden a otras partes de la red para su posterior verificación.

3. Verificación y validación por los nodos

Cuando la transacción llega a cada nodo, este lleva a cabo una serie de verificaciones para asegurarse de que la transacción cumpla con las reglas del protocolo de Bitcoin:

- **Verificación de la firma digital:** Se comprueba que la firma digital sea válida y coincida con la clave pública asociada al emisor.
- **Disponibilidad de fondos:** Los nodos verifican que el emisor tiene suficientes fondos, revisando las UTXO asociadas a su dirección.
- **Prevención de doble gasto:** Se asegura que la transacción no sea un intento de doble gasto, es decir, que los mismos fondos no hayan sido ya gastados en otra transacción.

Si la transacción pasa estas validaciones, los nodos la propagan a otros nodos de la red.

4. Agrupación de transacciones en un bloque

Las transacciones validadas por los nodos son agrupadas en bloques por los mineros, quienes compiten para resolver un complejo problema criptográfico utilizando el algoritmo de Prueba de Trabajo (*Proof of Work, PoW*). Como se explicó anteriormente, este proceso se conoce como “minado”. El primer minero en encontrar la solución crea un bloque válido con las transacciones verificadas y lo transmite al resto de la red.

5. Incorporación del bloque a la blockchain

Una vez que un bloque es validado por el resto de los nodos de la red, se incorpora de forma permanente a la *blockchain*. Este bloque contiene todas las transacciones verificadas, incluyendo las del emisor y el receptor. Dado que la *blockchain* es un registro público e inmutable, las transacciones registradas no pueden ser modificadas ni eliminadas.

6. Confirmaciones de la transacción

Después de que el bloque se añade a la blockchain, la transacción se considera “confirmada”. Cada nuevo bloque que se agrega a la blockchain aumenta el número de confirmaciones de esa transacción. Cuantas más confirmaciones tenga una transacción, más difícil será revertirla o realizar un doble gasto. Por lo general, entre 6 y 12 confirmaciones son consideradas suficientes para asegurar la irreversibilidad de la transacción, aunque este número puede variar dependiendo del monto y el contexto de seguridad deseado.

7. Finalización y acceso a los fondos

Una vez que la transacción recibe el número requerido de confirmaciones, el receptor puede acceder a los bitcoins enviados. La transacción se ha completado de manera permanente y segura, quedando registrada en la *blockchain* como parte del historial inmutable de Bitcoin. El receptor puede ahora transferir esos fondos a otra dirección o utilizarlos de acuerdo a sus necesidades.

A continuación, se muestra en la Figura 2-7 un esquema de estas etapas. El gráfico destaca la seguridad, la verificación y la descentralización en el funcionamiento de esta criptomoneda.

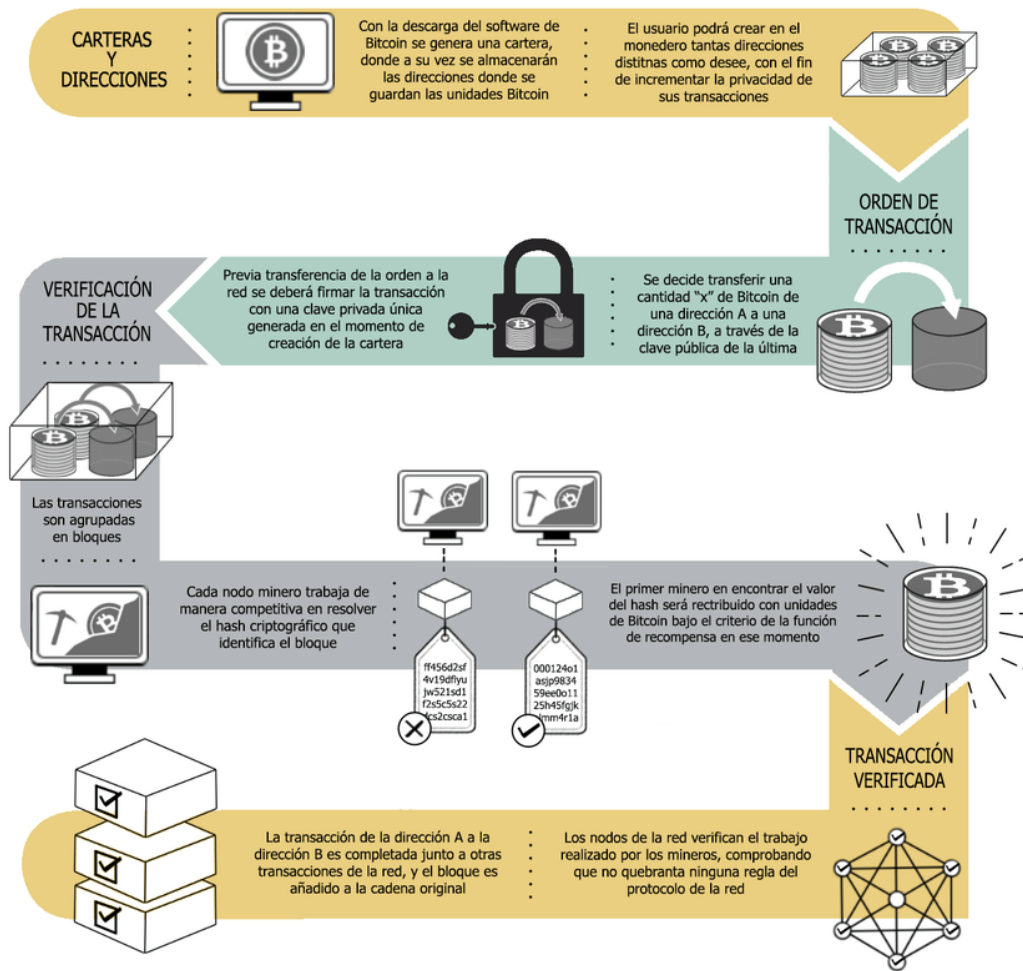


Figura 2-7. Esquema de las etapas de una transacción en Bitcoin (Gomez, 2020)

2.3. Infraestructura técnica para la minería

La minería de Bitcoin es un proceso que requiere una gran potencia de cómputo, lo que implica el uso de hardware especializado y software eficiente. A medida que la popularidad de Bitcoin creció, también

lo hizo el número de personas involucradas en la resolución de los problemas criptográficos necesarios para validar las transacciones en la red. Para llevar a cabo esta tarea, los mineros utilizan equipos de alta potencia que les permiten realizar estos cálculos de manera más rápida y eficiente. Tanto el hardware como el software desempeñan un papel crucial en la rentabilidad de la minería de Bitcoin.

2.3.1. Hardware para la minería de Bitcoin

En los primeros días de Bitcoin, la minería podía realizarse con computadoras personales (*PC, Personal Computer*) equipadas con procesadores de propósito general (*CPU, Central Processing Unit*). Sin embargo, el rendimiento de un CPU estándar es limitado, especialmente en términos de la *cantidad de hashes* que puede calcular por segundo. Incluso utilizando un CPU con tarjeta gráfica integrada, la *tasa de hash* obtenida era muy baja, dependiendo de factores como la criptomoneda, el software utilizado y el algoritmo de consenso implementado.

Entre 2010 y 2012, la minería de Bitcoin aún era viable para mineros aficionados con hardware convencional. Procesadores como el Intel Core 2 Duo o los primeros Intel i7 podían alcanzar hasta 100 kilohashes por segundo (100,000 H/s o 100 kH/s) con software como *CPU Miner*. Por su parte, tarjetas gráficas como la ATI Radeon HD 5870 ofrecían tasas significativamente superiores, marcando el inicio de la minería con GPUs. En esta etapa temprana, muchos entusiastas podían participar en la red y recibir recompensas sin necesidad de equipos especializados (BitcoinWiki, s.f.).

Sin embargo, con el aumento de la *dificultad de la red*, un solo CPU dejó de ser suficiente para resolver los complejos problemas criptográficos que protegen la red de Bitcoin. A continuación, se describe el hardware de minería más utilizado actualmente, el cual se clasifica principalmente en tres categorías: ASIC, GPU y FPGA.

ASIC (Circuito Integrado para Aplicaciones Específicas)

Los ASICs (*Application-Specific Integrated Circuit*) son el tipo de hardware más eficiente para la minería de Bitcoin, ya que están diseñados exclusivamente para ejecutar las *funciones hash* del algoritmo SHA-256, utilizado por esta criptomoneda. Debido a su alto grado de especialización, un ASIC desarrollado para Bitcoin solo puede utilizarse para minar esta criptomoneda, lo que lo hace mucho más eficiente que otros dispositivos, como las GPUs (Bitmain, 2020).

En términos de velocidad y eficiencia energética, los ASICs superan ampliamente a las GPUs, ya que consumen mucho menos energía por cada *hash* calculado. Entre los modelos más destacados se encuentran el *Antminer S19 Pro* de Bitmain y el *WhatsMiner M30S* de MicroBT, reconocidos por su alto rendimiento y bajo consumo energético.

Bitmain, fundada en 2013, es líder en el mercado de minería de Bitcoin, de su línea *Antminer* se destaca especialmente el modelo S19 Pro, que ofrece una *tasa de hash* de 110 TH/s. Por su parte, MicroBT, fundada en 2016, ha ganado popularidad con su serie *WhatsMiner*, donde el modelo M30S alcanza una tasa de hash de 88 TH/s. Aunque Bitmain sigue liderando el mercado, MicroBT se ha consolidado como una alternativa confiable, especialmente valorada por su eficiencia energética. En la Figura 2-8 se muestran fotografías de estos productos insignia de ambas empresas.



Figura 2-8. Fotografías de un ASIC Antminer S19 Pro (izquierda) y un ASIC WhatsMiner M30S (derecha)

Factores clave a considerar al utilizar equipos ASIC para minería de Bitcoin (RiverLearn, s.f.):

- **Costos iniciales:** Al adquirir un ASIC, es fundamental considerar no solo el precio del equipo, sino también los gastos de envío y las tarifas de importación, que pueden ser significativos dependiendo del país de destino. Además, no se deben olvidar los costos de mantenimiento y las posibles actualizaciones de hardware, que pueden generar gastos adicionales a lo largo del tiempo.
- **Tasa de hash (*hashrate*):** Mide la velocidad con la que el equipo realiza los cálculos criptográficos necesarios para validar los bloques en la red. La *tasa de hash* típica de los equipos

más avanzados es del orden de 100 terahashes por segundo (100 TH/s), lo que equivale a 100 billones de hashes por segundo (100,000,000,000,000 H/s). Sin embargo, modelos más recientes pueden superar esta cifra, como el *Antminer S19 XP*, que ofrece 140 TH/s.

- **Consumo de energía:** Aunque los ASICs son dispositivos eficientes, su consumo eléctrico puede ser considerable y varía según el modelo y la eficiencia energética de cada equipo. Por ejemplo, el *Antminer S19 XP* requiere aproximadamente 5,000 W, lo que representa un costo operativo significativo. Este consumo impacta directamente en la rentabilidad de la minería.
- **Eficiencia energética:** Es un factor crucial para reducir los costos operativos. La eficiencia se mide comúnmente en julios por terahash (J/TH) y permite comparar el rendimiento energético entre diferentes modelos. Cuanto menor sea este valor, más eficiente será el equipo. Ejemplos de modelos eficientes incluyen el *Antminer S19 Pro* y el *Antminer S19 XP*, conocidos por su excelente relación entre tasa de hash y consumo energético.
- **Sistemas de enfriamiento:** Mantener una temperatura óptima es esencial para asegurar el rendimiento y prolongar la vida útil del equipo. Las soluciones de enfriamiento incluyen:
 - **Refrigeración por aire:** Utiliza ventiladores y disipadores de calor para extraer el calor de los chips internos.
 - **Refrigeración líquida:** Emplea fluidos especiales para absorber el calor de los chips y disiparlo a través de radiadores, siendo más eficiente en climas cálidos.
 - **Inmersión en líquido dieléctrico:** Sumergir el equipo en un fluido no conductor permite una disipación térmica más eficiente y uniforme, ideal para instalaciones a gran escala.
 - **Refrigeración externa:** En climas cálidos, como el de El Salvador, es común emplear sistemas de enfriamiento adicionales, como aires acondicionados, para evitar el sobrecalentamiento y optimizar el rendimiento térmico de los equipos.
- **Nivel de ruido:** Los ASICs generan un ruido considerable debido a los ventiladores de alta velocidad. Por ello, es importante ubicar los equipos en lugares donde no causen molestias, como sótanos o áreas con aislamiento acústico. En grandes instalaciones de minería, es común instalarlos en zonas no residenciales o en áreas alejadas de centros urbanos, o incluso utilizar soluciones de insonorización para mitigar el ruido.

GPU (Unidad de Procesamiento Gráfico)

Las GPUs (*Graphics Processing Unit*) fueron diseñadas originalmente para renderizar imágenes en videojuegos y gráficos 3D interactivos. Sin embargo, debido a su capacidad para realizar cálculos en paralelo, también han demostrado ser eficaces en la minería de criptomonedas. Aunque su rendimiento en la minería de Bitcoin es inferior al de los ASICs, las GPUs siguen siendo una opción viable, especialmente en proyectos de pequeña escala. Además, son más competitivas en la minería de criptomonedas que emplean algoritmos distintos al de Bitcoin, como Ethereum y Ergo. Algunas de las tarjetas gráficas más populares incluyen la NVIDIA RTX 3080 y la AMD Radeon RX 6800 XT.

En sus inicios, la minería de criptomonedas se realizaba con PCs ensambladas que incorporaban múltiples tarjetas gráficas. Estos sistemas eran complejos, con cables expuestos y soluciones de refrigeración improvisadas, lo que los hacía parecerse a las plataformas de perforación petrolera, conocidas como “oil rigs”. Es por eso que ahora se le llama *rig de minería* a una configuración especializada que agrupa varias GPUs para realizar los cálculos necesarios. Este tipo de ensamblaje se ha vuelto muy común en el ámbito de la minería digital. La palabra “rig”, que proviene del lenguaje técnico y mecánico en inglés, se usa ahora comúnmente para referirse a este tipo de configuraciones en la minería digital (Shevchenko, 2020).

Aunque los *rigs de GPUs* se utilizaron principalmente para minar criptomonedas como Ethereum, también son adecuados para otras monedas que emplean algoritmos de consenso *Proof of Work* (PoW), incluido Bitcoin. Estos *rigs* consisten en varias tarjetas gráficas conectadas a una placa base mediante puertos PCIe (*Peripheral Component Interconnect Express*). Un CPU controla el sistema, coordinando las tareas de minería y gestionando las GPUs. La combinación de múltiples tarjetas permite realizar cálculos simultáneos, maximizando la potencia de cómputo disponible.

Los *rigs de minería* con GPUs ofrecen escalabilidad, permitiendo a los mineros agregar más tarjetas conforme aumente la rentabilidad o la dificultad de la red. Esta flexibilidad facilita ajustar el rendimiento a las condiciones del mercado, simplemente añadiendo más GPUs para incrementar la *tasa de hash*. A diferencia de los ASICs, los *rigs* son fácilmente actualizables; si una tarjeta pierde eficiencia o se daña, puede reemplazarse sin cambiar todo el sistema.

En la Figura 2-9 se muestra un *rig de minería* compuesto por seis tarjetas gráficas NVIDIA RTX 3080, uno de los modelos más potentes para la minería de criptomonedas, ideal para minar monedas como Ethereum o Ergo. Este *rig* viene completamente ensamblado y probado, listo para operar y cuenta con

tres fuentes de alimentación de 1,600 W para soportar el alto consumo energético (LaudeMMedia, s.f.).



Figura 2-9. Rig de minería con 6 tarjetas gráficas NVIDIA RTX 3080

FPGA (Arreglo de Compuertas Programables en Campo)

Los FPGAs (*Field Programmable Gate Array*) son circuitos integrados altamente versátiles, a diferencia de los ASICs, ya que pueden ser programados o reprogramados después de su fabricación. Esta capacidad permite que un mismo chip se adapte a diversas aplicaciones, como “Computación de Alto Rendimiento” (*HPC, High-Performance Computing*), procesamiento de señales, sistemas embebidos y minería de criptomonedas. Aunque los FPGAs son menos comunes que los ASICs y las GPUs, algunos mineros los prefieren por su flexibilidad y bajo consumo energético.

El término “programables en campo” hace referencia a la capacidad de programar el chip *in situ*, es decir, después de su fabricación, sin necesidad de modificar físicamente su estructura interna. Esta característica convierte a los FPGAs en una opción ideal para el desarrollo de prototipos, aplicaciones experimentales y entornos que requieren flexibilidad en el diseño del hardware.

A diferencia de otros chips con funciones predefinidas, los FPGAs son dispositivos flexibles que, al salir de fábrica, no tienen un funcionamiento específico. Por ello, los ingenieros emplean “Lenguajes de

Descripción de Hardware” (*HDL, Hardware Description Language*), como VHDL o Verilog, para diseñar y programar el comportamiento de los circuitos digitales según las necesidades particulares.

Una empresa pionera en el sector, Xilinx, lanzó el primer FPGA comercial en 1985. Desde entonces, esta tecnología ha evolucionado notablemente y hoy se emplea en una amplia variedad de industrias. Una de sus principales ventajas es la capacidad de reconfigurarse mediante actualizaciones de software, lo que permite adaptar los FPGAs a nuevas tareas o algoritmos sin necesidad de reemplazar el hardware. Esta flexibilidad contrasta con los ASICs, que están diseñados para cumplir funciones fijas y específicas (IBM, 2025).

A continuación, se muestra una tabla, en donde se comparan las características de un ASIC Antminer S19 Pro, un rig de GPUs RTX 3080 y una FPGA VCU1525.

Característica	ASIC Antminer S19 Pro	GPU Rig 6x RTX 3080	FPGA Xilinx VCU1525
Número de Unidades	1 Antminer S19 Pro	6 tarjetas gráficas RTX 3080	1 FPGA Xilinx VCU1525
Tasa de Hash	110 TH/s	600 MH/s	10 TH/s
Costo Inicial	US\$ 2,000 - US\$ 2,500	US\$ 10,000 - US\$12,000 (rig completo)	US\$ 2,000 - US\$ 3,000
Consumo Energético	3,250 W	1,600 W	300 W
Eficiencia Energética	29.5 J/TH	2.5 J/MH	80 J/TH
Algoritmos Compatibles	Bitcoin (SHA-256)	Ethereum, Ergo, etc.	Bitcoin (SHA-256)
Ventajas	Alta eficiencia energética	Mayor flexibilidad, actualizable	Alta eficiencia energética, configurable
Rentabilidad en Minería de Bitcoin	Alta (debido a alta eficiencia)	Baja (debido a mayor consumo)	Alta (debido a alta eficiencia)

Tabla 2.1. Comparación entre ASIC, rig de GPUs y una FPGA VCU1525

2.3.2. Software para la minería de Bitcoin

El software de minería es fundamental para gestionar y optimizar el proceso de minería en redes *blockchain* como Bitcoin. Su función principal es conectar el hardware de minería, ya sea GPU o ASIC, con la red de la criptomoneda para realizar los cálculos criptográficos necesarios que validan transacciones y permiten agregar bloques a la cadena a cambio de recompensas.

Los programas de minería pueden ser utilizados tanto en minería individual, donde el minero opera de forma autónoma, como en *pools de minería*, donde varios mineros combinan su potencia de cómputo para aumentar la probabilidad de encontrar bloques y compartir las recompensas según su contribución.

Dentro del ecosistema de la minería de Bitcoin, *CGMiner* es uno de los software más populares y utilizados, principalmente por su naturaleza de código abierto. Una de sus principales fortalezas es su compatibilidad con una amplia gama de hardware, incluyendo ASICs, FPGAs y GPUs, lo que permite a los mineros gestionar y monitorear sus dispositivos de forma eficiente. Además, *CGMiner* ofrece múltiples opciones de personalización, lo que lo convierte en una herramienta flexible y adecuada tanto para principiantes como para usuarios avanzados.

Otro software destacado es *BFGMiner*, similar a *CGMiner* en cuanto a funcionalidades, pero orientado especialmente a la minería con FPGAs y ASICs. Aunque comparten muchas características, *BFGMiner* se distingue por ofrecer un control más detallado y preciso sobre el funcionamiento del hardware especializado, lo que lo convierte en una herramienta singularmente útil para operaciones de minería a gran escala.

Para los usuarios principiantes, *EasyMiner* es una opción más accesible gracias a su interfaz gráfica de usuario (*GUI, Graphical User Interface*), que facilita la configuración y el monitoreo de las operaciones de minería. *EasyMiner* funciona como una capa frontal que interactúa con *CGMiner* y *BFGMiner* en segundo plano, brindando a los nuevos mineros acceso a las potentes funciones de estos programas subyacentes, todo a través de un entorno visual amigable, ideal para aquellos que no están familiarizados con la línea de comandos (Colomer, 2022).

Los dispositivos Antminer de la serie Bitmain vienen con *Braiins OS* preinstalado, un sistema operativo personalizado y diseñado específicamente para equipos ASIC. Este software de código abierto optimiza la minería al permitir ajustar parámetros avanzados, como la frecuencia de operación y el voltaje de los chips, mejorando así el rendimiento y reduciendo el consumo energético.

El software *Braiins OS* ofrece herramientas para monitorear en tiempo real el estado de los dispositivos, detectar fallos y realizar ajustes remotos. Su enfoque en la eficiencia energética y la personalización lo convierte en una opción popular entre los mineros que buscan maximizar la rentabilidad. Además, al ser de código abierto, proporciona flexibilidad y control total sobre las configuraciones.

En la Figura 2-10 se muestra el *dashboard* de *Braiins OS* en un Antminer S19. Este panel de control permite a los usuarios supervisar y ajustar las configuraciones de manera eficiente, optimizando así la operación del sistema y mejorando su rendimiento.

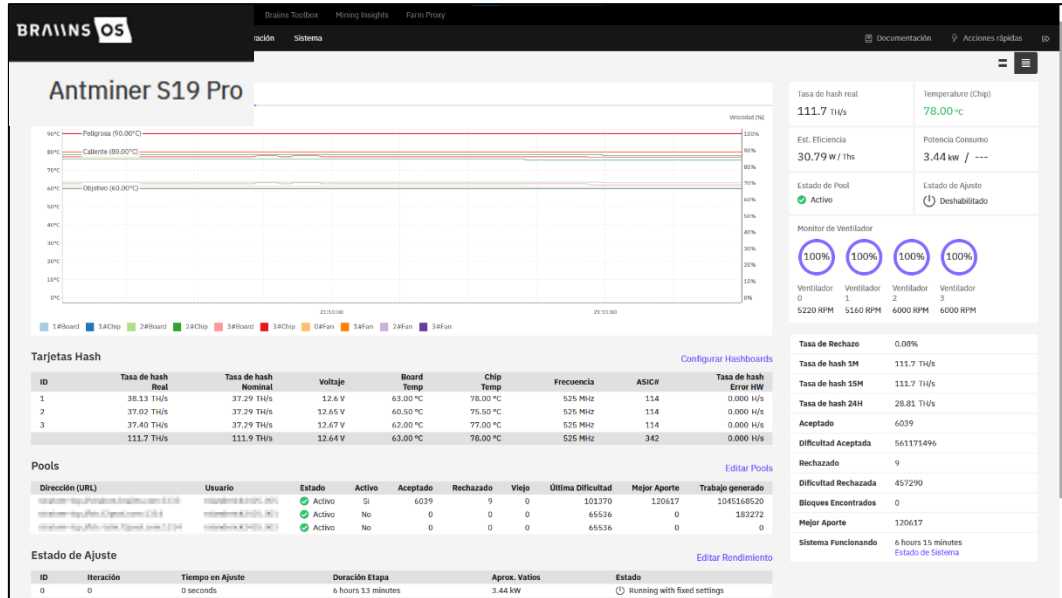


Figura 2-10. Panel de control o dashboard de Braiins OS en el Antminer S19 Pro

2.4. Pools de minería

La minería individual de Bitcoin se ha vuelto cada vez más compleja y costosa debido a dos factores principales: la creciente competencia entre mineros y el aumento constante de la *dificultad de la red*. Por ello, muchos mineros optan por unirse a *pools de minería*, donde combinan la potencia de cómputo de varios participantes. Esta colaboración incrementa significativamente las probabilidades de añadir bloques a la *blockchain*, y las recompensas se distribuyen entre los miembros según su contribución proporcional.

Además, el *halving*, que reduce a la mitad la recompensa por bloque minado, representa un desafío importante al disminuir la rentabilidad de la minería. Este fenómeno ha impulsado a muchos mineros a buscar alternativas para mantener sus ingresos. En este contexto, los *pools de minería* permiten operar de manera rentable incluso cuando los costos de operación superan los ingresos generados por la minería individual.

Entre los *pools de minería* más destacados se encuentran *F2Pool*, *ViaBTC*, *Antpool* y *Foundry USA Pool*. Este último se ha consolidado como líder en términos de *tasa de hash global*. En la Figura 2-11 se

muestra que *Foundry USA Pool* contribuyó con más del 34 % de los bloques minados en enero de 2025. Este logro es significativo, considerando el tamaño y la descentralización de la industria minera de Bitcoin. Sin embargo, algunos cuestionan si la concentración de tanta potencia de minado en unos pocos *pools* podría estar generando una tendencia hacia la *centralización del Bitcoin*, lo que contraviene uno de los principios fundamentales de su red descentralizada (CoinSurges, 2025).

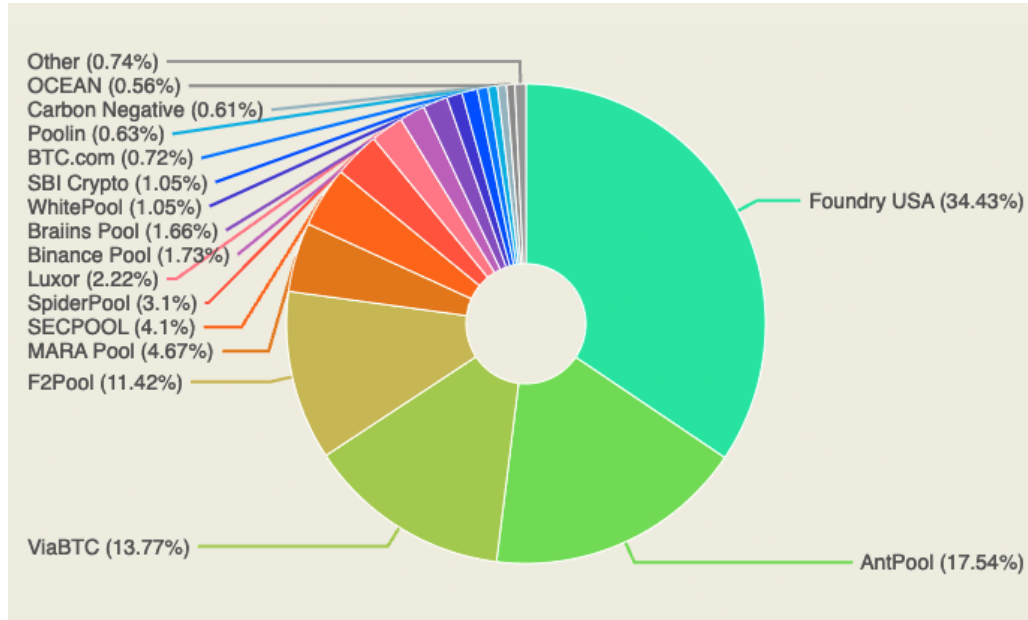


Figura 2-11. Participación de mercado de varios *pools de minería* en enero de 2025

Además de los *pools* tradicionales, *Braiiins Pool* se ha consolidado como uno de los más eficientes y transparentes en la red Bitcoin, destacándose por su integración directa con el Antminer S19 Pro mediante *Braiiins OS*, un sistema operativo optimizado para dispositivos ASIC. Este *pool* utiliza el modelo de recompensa FPPS (*Pago Completo Por Participación*), que garantiza a los mineros tanto las recompensas por bloque como las comisiones por transacción. Una de sus principales ventajas es su baja comisión del 1 %, lo que maximiza las ganancias para los mineros.

Actualmente, *Braiiins Pool* cuenta con una *tasa de hash global* aproximado de 13.93 exahashes por segundo (EH/s), tal como se observa en la Figura 2-12, posicionándose entre los *pools* más competitivos de la red. En enero de 2025, su participación global alcanzó cerca del 1.66 % de todos los bitcoins minados, ubicándolo en el décimo lugar en términos de contribución a la minería de Bitcoin. Desde su creación, *Braiiins Pool* ha minado más de 1,310,035 BTC, demostrando su solidez y capacidad operativa. Esta alta *tasa de hash*, junto con la eficiencia energética proporcionada por *Braiiins OS*, asegura una

minería rentable y sostenible para los usuarios de Antminer S19 Pro y otros dispositivos ASIC compatibles (Braains, s.f.).

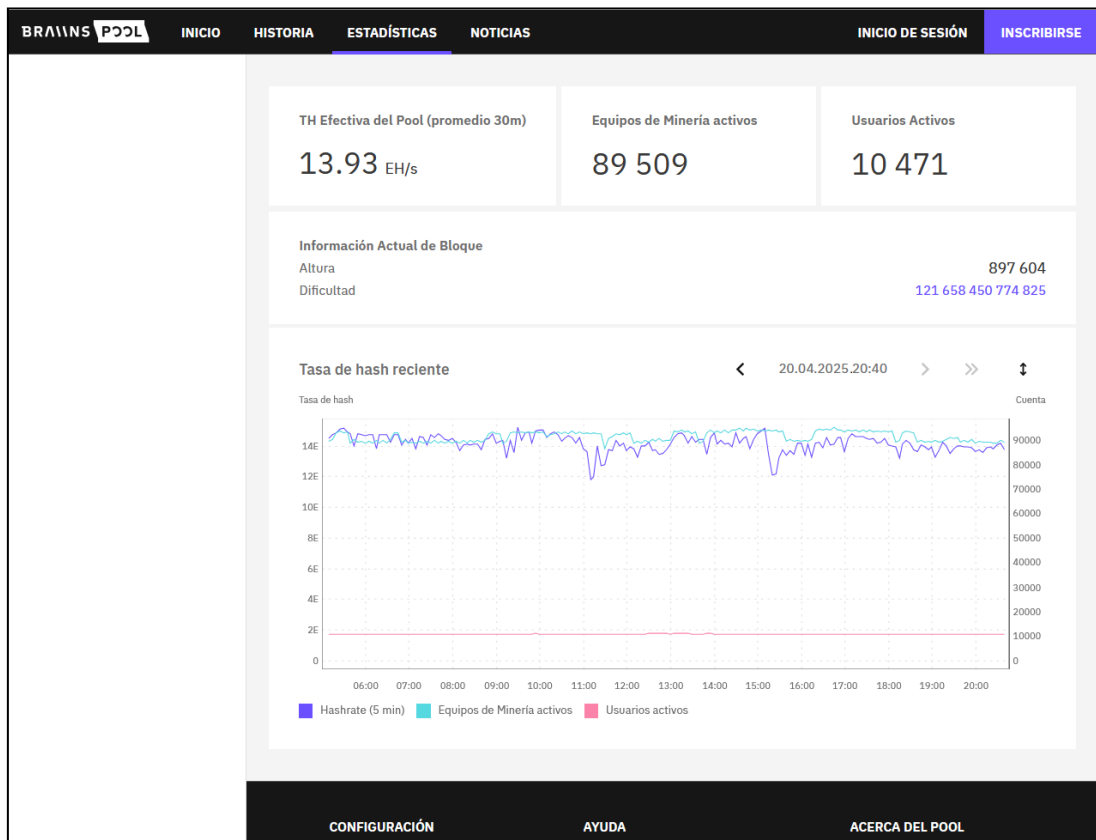


Figura 2-12. Estadística del desempeño de Braains Pool

2.4.1. Minería en solitario

La minería en solitario consiste en que un minero opera de forma independiente, utilizando su propio equipo de cómputo para agregar bloques a la *blockchain*. Cuando logra resolver un bloque, recibe la recompensa completa, que incluye tanto la recompensa fija por bloque como las comisiones por las transacciones incluidas en ese bloque.

Este modelo enfrenta varios desafíos. El primero es la elevada inversión inicial en hardware especializado, como los ASICs, y los costos operativos, especialmente el consumo energético, que pueden resultar difíciles de cubrir si los ingresos no son constantes. Además, debido a la alta competitividad de la red, la probabilidad de obtener recompensas depende directamente de la *tasa de hash* del minero, lo que puede llevar a largos períodos sin ingresos.

Por estas razones, la minería en solitario es más adecuada para quienes tienen infraestructura avanzada y están dispuestos a asumir el riesgo que implica la variabilidad de las recompensas. Una infraestructura avanzada en minería de criptomonedas incluye hardware de alto rendimiento, acceso a energía barata, espacios adecuados para alojar los equipos, software especializado y una gestión eficiente de los recursos. Estos factores optimizan las operaciones y aumentan las posibilidades de obtener recompensas, reduciendo riesgos y costos (Bitcoin Mining Insights, s.f.).

2.4.2. Minería en grupo (*pools* de minería)

Un *pool de minería* es un grupo de mineros que combinan su potencia de cómputo para minar criptomonedas de manera colectiva. Las recompensas obtenidas se distribuyen entre los participantes proporcionalmente a su contribución. Este modelo aumenta significativamente las probabilidades de obtener recompensas periódicas, incluso cuando la *dificultad de la red* es alta, en comparación con la minería en solitario.

Uno de los principales desafíos en la minería de Bitcoin es su elevado consumo energético. Se estima que cada transacción de Bitcoin consume aproximadamente 707 kilovatios-hora (kWh) de electricidad, una cifra considerablemente alta en comparación con otras criptomonedas, como Ethereum, que utiliza hasta 11 veces menos energía por transacción (Digiconomist, 2024).

Al comparar el consumo energético de Bitcoin con el de otros sistemas de pago, como VISA, la diferencia es evidente. Según los datos de 2019, VISA consumió un total de 205,233.2 MWh para procesar 138,300 millones de transacciones. Esto equivale a un consumo energético de aproximadamente 0.0015 kWh por transacción, lo que resulta ser mucho más eficiente en términos energéticos en comparación con Bitcoin (Digiconomist, 2024).

Además de las recompensas por bloque, los mineros reciben comisiones por las transacciones procesadas. Estas comisiones no dependen del valor monetario de la transacción, sino de su tamaño en bytes dentro de la *blockchain*. A mayor tamaño de la transacción, mayor será el costo asociado. Es importante destacar que estas comisiones no son fijas, ya que es el usuario quien decide cuánto está dispuesto a pagar. En momentos de congestión de la red, las transacciones con comisiones más altas suelen tener prioridad para los mineros (Bit2MeAcademy, 2019).

El concepto de *pools de minería* surgió cuando la dificultad para agregar bloques a la *blockchain*, o de manera más simple para *resolver un bloque*, aumentó tanto que los mineros con baja tasa de hash

podían tardar años en lograrlo. Al unirse y agrupar sus recursos, los mineros obtienen recompensas más frecuentes y predecibles, evitando largos períodos de espera y aumentando sus probabilidades de añadir bloques con mayor regularidad.

Modelos de pago en *pools de minería*

Los *pools de minería* utilizan diversos modelos de pago, cada uno con características particulares. A continuación, se describen los más comunes (ViaBTC, 2022):

- **Pay Per Share (PPS) / Pago Por Participación:** En este modelo, los mineros reciben un pago fijo por cada *acción válida que aportan al pool*, independientemente de si el bloque se resuelve o no. Una “acción” representa un intento computacional de resolver el problema criptográfico necesario para validar un bloque. El valor de cada acción se calcula en función de la cantidad de acciones requeridas para resolver un bloque. Por ejemplo, si se necesitan 1,000 acciones válidas para resolver un bloque y la recompensa es de 3.125 BTC, cada acción tendrá un valor de 0.003125 BTC. Este modelo ofrece pagos predecibles, lo que resulta atractivo para los mineros que buscan estabilidad.
- **Pay Per Last N Shares (PPLNS) / Pago Por Últimas N Participaciones:** En este modelo, los mineros reciben pagos únicamente cuando el *pool resuelve un bloque*. Las recompensas se distribuyen en función de las acciones válidas que los mineros hayan realizado durante un período de tiempo específico, conocido como “ventana de participación”. Este sistema motiva a los mineros a contribuir de manera constante al *pool*, ya que las recompensas se calculan según las participaciones más recientes, en lugar de la cantidad de bloques resueltos.
- **Full Pay Per Share (FPPS) / Pago Completo Por Participación:** En este modelo, los mineros reciben tanto la recompensa *por encontrar un bloque* como un pago adicional por las comisiones generadas por las transacciones incluidas en ese bloque. A diferencia del modelo PPS, que no toma en cuenta las *comisiones por transacción*, el modelo FPPS asegura que los mineros sean compensados de manera integral por su trabajo, cubriendo tanto las recompensas de bloque como las comisiones por transacción.
- **PPS+ / Pago Por Participación Plus:** Este modelo combina elementos de los sistemas PPS y PPLNS. Los mineros reciben un pago fijo por cada acción válida, incluso si no se resuelve un bloque, similar al modelo PPS. Además, cuando el *pool* resuelve un bloque, los mineros reciben

una parte de las comisiones por transacción, distribuidas según el esquema PPLNS. Esto asegura que los mineros reciban siempre una recompensa, independientemente de si el bloque es resuelto o no.

La elección del modelo de pago en un *pool de minería* depende de varios factores, como la frecuencia de los pagos y la rentabilidad esperada según el nivel de *dificultad de la red*. Los mineros deben evaluar sus prioridades y decidir si prefieren pagos constantes y predecibles (PPS), o si están dispuestos a asumir más riesgos a cambio de mayores recompensas basadas en el rendimiento del *pool* (PPLNS).

Las ventajas de operar en *pools de minería*, como se muestra en la Figura 2-13, incluyen: (1) un flujo constante de ingresos, (2) no requiere grandes inversiones iniciales, (3) una mayor estabilidad, (4) oportunidades de aprendizaje, y (5) apoyo de la comunidad. Sin embargo, también existen desventajas, tales como: (1) las tarifas del pool de minería y (2) la centralización de la potencia de minado.



Figura 2-13. Ventajas y desventajas de la minería en *pools* (CryptoMinerBros, 2024)

2.5. Minería en El Salvador

En octubre de 2021, El Salvador dio un paso histórico al anunciar el inicio de un proyecto piloto de minería de Bitcoin en su planta geotérmica de Berlín, ubicada en Usulután. La Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), a través de su subsidiaria LaGeo, destinó 1.5 megavatios (MW) de los 107 MW de capacidad total de la planta para alimentar 300 equipos ASIC, dedicados exclusivamente a la minería de Bitcoin. Este proyecto marcó un hito mundial, convirtiendo a El Salvador en el primer país en involucrarse activamente en la minería de criptomonedas a nivel estatal, utilizando una fuente de energía renovable y sostenible: la energía geotérmica (Alemán, 2021).

Según datos de 2024, la generación geotérmica en El Salvador alcanzó 1,455.5 gigavatios-hora (GWh), lo que representó el 19.8 % de la energía eléctrica total inyectada al sistema nacional, como se muestra en la Figura 2-14. De esta manera, se posicionó como la tercera fuente de generación más importante del país, después de la energía hidroeléctrica y la térmica/gas natural (U. Alemán, 2025).

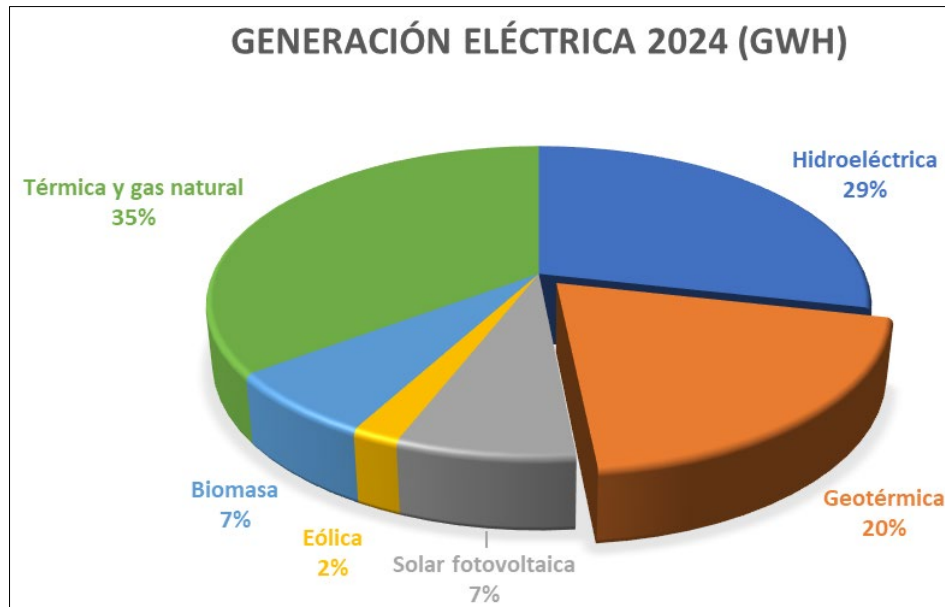


Figura 2-14. Energía eléctrica suministrada a la red nacional durante 2024 (elaboración propia)

Esto es posible porque El Salvador se encuentra en el Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las zonas con mayor actividad volcánica del mundo. Cerca del 90 % del territorio está compuesto por materiales de origen volcánico, lo que representa una ventaja geológica clave para el aprovechamiento de energía limpia y renovable. Según un estudio del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), el país posee 23 volcanes individuales y cinco campos volcánicos con antecedentes sísmicos, que incluyen diversas estructuras geológicas y lagos cratéricos (MARN, s.f.).

La planta geotérmica de Berlín, situada a 112 kilómetros al este de San Salvador, utiliza vapor geotérmico con temperaturas que alcanzan hasta 150 °C para generar electricidad a través de turbinas. Junto a la planta de Ahuachapán (con una capacidad instalada de 95 MW), ambas instalaciones abastecen energía limpia a 1.5 millones de salvadoreños. La energía geotérmica ha suministrado alrededor de una quinta parte de la electricidad del país en los últimos años (Alemán, 2021).

El proyecto minero de Bitcoin en Berlín es significativo por ser uno de los primeros en el mundo en el que un Estado participó activamente en la minería de criptomonedas, en lugar de prohibirla o regularla estrictamente, como ha ocurrido en otros países. Desde su lanzamiento en 2021, este proyecto ha

permitido que El Salvador se posicione como un líder en la integración de criptomonedas en su economía.

Según la Oficina de Bitcoin de El Salvador, entre el inicio del proyecto en 2021 y finales de 2023, el país logró minar un total de 474 bitcoins en la planta de Berlín, Usulután. Con el precio del bitcoin a principios de 2024, el valor total de los 474 BTC minados ascendía a aproximadamente US\$ 29 millones. En la Figura 2-15 se muestra el contenedor que alberga el equipo minero. Además de estos datos, Reuters (2024) ratifica que en este sitio operan cerca de 300 unidades ASIC y se destinan 1.5 MW de lo generado por la planta geotérmica, exclusivamente para la minería de Bitcoin.

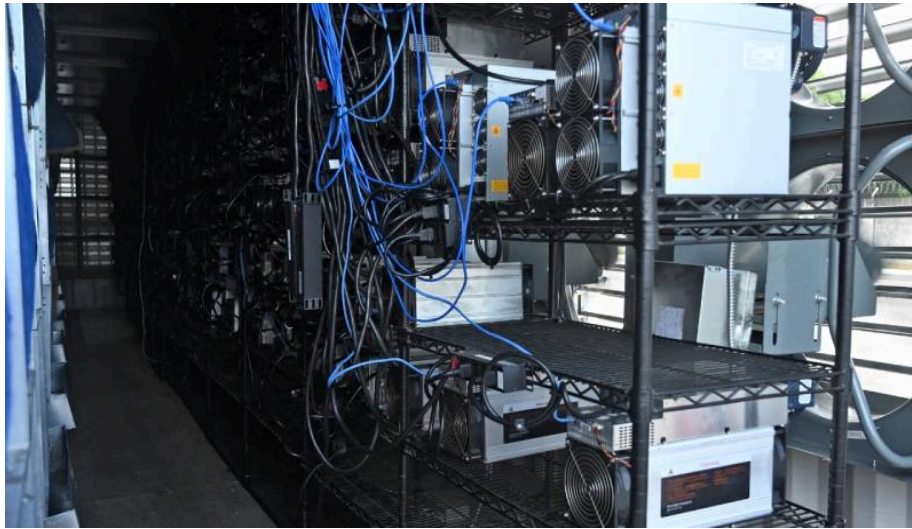


Figura 2-15. Equipo minero instalado en la planta geotérmica de Berlín, Usulután (Agencia A.F.P., 2021)

A pesar de estos avances, el gobierno ha enfrentado críticas por la falta de transparencia en cuanto a los detalles financieros del proyecto, como el monto invertido en infraestructura y el tamaño exacto de la planta minera. Aunque la operación fue presentada como una estrategia clave del presidente Nayib Bukele, ha generado controversia sobre la centralización del control de los recursos energéticos. Esta situación ha generado tensiones con los principios fundamentales de la red de Bitcoin, que promueve la descentralización de las actividades mineras (Alvarado, 2024).

La minería de Bitcoin en El Salvador es un experimento ambicioso con potencial para transformar la economía del país. No obstante, sus beneficios deben equilibrarse con los impactos sociales, económicos y ambientales, especialmente considerando la alta volatilidad del precio de Bitcoin, que puede generar pérdidas rápidas. El éxito de esta iniciativa dependerá de la capacidad del gobierno para gestionar los recursos de forma transparente y maximizar los beneficios para toda la población.

2.6. Sostenibilidad y evolución de la minería de criptomonedas

El futuro de la minería de criptomonedas dependerá de equilibrar rentabilidad, sostenibilidad energética y aceptación social. El alto consumo eléctrico del algoritmo *Proof of Work* (PoW), utilizado en redes como Bitcoin, ha generado debates regulatorios a nivel internacional. En China la actividad fue prohibida por razones energéticas y ambientales, mientras que en Estados Unidos existen regulaciones estatales para evaluar su impacto en los sistemas eléctricos. De igual manera, han surgido alternativas como *Proof of Stake* (PoS), que reducen la demanda energética al eliminar la competencia computacional intensiva sin comprometer la seguridad ni la descentralización (Cole, 2024).

La evolución de los equipos ASIC ha permitido mejorar la eficiencia energética (J/TH), optimizando la relación entre la energía consumida y la potencia de cómputo. Sin embargo, el crecimiento sostenido de la *tasa de hash global*, junto con la operación continua de los equipos en régimen permanente, mantiene elevada la demanda eléctrica total. En consecuencia, el consumo energético continúa siendo el principal componente del costo operativo, lo que hace imprescindible analizar con precisión la potencia absorbida y la energía efectivamente consumida bajo condiciones reales de operación.

En este contexto, resulta fundamental evaluar el impacto energético de la minería en escenarios locales específicos, como el sistema eléctrico de El Salvador, considerando variables técnicas y económicas propias de su estructura tarifaria y matriz de generación. Con base en estos elementos, el siguiente capítulo presenta un análisis cuantitativo del consumo eléctrico de los equipos ASIC y su incidencia en los costos operativos, proporcionando información relevante tanto para decisiones técnicas como financieras.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO ASOCIADO A LA MINERÍA DE BITCOIN

La minería de Bitcoin, como se explicó en los capítulos anteriores, se basa en un algoritmo de consenso denominado “Prueba de Trabajo” (*Proof of Work*, PoW), el cual tiene como objetivo principal la validación de transacciones mediante complejos cálculos matemáticos. Este proceso requiere equipos con alta potencia de cómputo, lo que conlleva un consumo energético significativo. Además, dicho consumo aumenta a medida que la *dificultad de la red* se incrementa y la recompensa por bloque disminuye, con el fin de mantener constante la generación de bloques en la *blockchain*.

A nivel internacional, uno de los temas más debatidos sobre la minería de criptomonedas es su elevado consumo energético. Este asunto cobró relevancia en El Salvador cuando, en septiembre de 2021, el Bitcoin fue adoptado como moneda de curso legal, lo que despertó el interés de muchas personas en desarrollar operaciones de minería en el país. Sin embargo, para que esta actividad sea rentable y sostenible, depende en gran medida del costo, la disponibilidad y la fuente de la energía utilizada.

En este capítulo, se evalúa el consumo energético del Antminer S19 Pro, un equipo ASIC de última generación reconocido por su eficiencia en la minería de Bitcoin. Dado que este modelo está disponible en el mercado desde 2020, se pudo adquirir a un precio más económico, lo que permitió realizar pruebas en condiciones locales para validar los datos proporcionados por el fabricante. El objetivo es establecer una referencia precisa de los desafíos energéticos de este tipo de operaciones en El Salvador.

Además, se analizará la matriz energética nacional para determinar si existe suficiente energía disponible para cubrir la demanda actual y la que representarán las futuras plantas de minería de Bitcoin, a medida que la actividad siga creciendo. Se calcularán los costos de operación de un equipo de minería para evaluar la viabilidad de adquirir energía de la red pública, así como las ventajas de implementar una planta solar fotovoltaica como solución alternativa.

3.1. Evaluación del desempeño energético y térmico del equipo ASIC

En los últimos años, el uso de Bitcoin ha crecido considerablemente. Inicialmente, solo atraía a personas con conocimientos avanzados en informática, pero con el tiempo su atractivo se ha extendido a un público más amplio, gracias a características como su descentralización, la rapidez en las

transacciones y la ausencia de intermediarios. Este crecimiento ha sido tan notable que, hoy en día, esta criptomoneda se presenta como una opción innovadora para quienes buscan nuevas formas de inversión e intercambio de bienes. Sin embargo, su uso masivo ha generado complicaciones, entre las cuales destaca su elevado consumo energético.

Para dimensionar la magnitud de este consumo, distintas instituciones han desarrollado herramientas de monitoreo y análisis. Una de las más destacadas es el *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index* (CBECI), elaborado por la Universidad de Cambridge. Este índice estima el consumo anual de electricidad de la red de Bitcoin y permite evaluar su evolución histórica. En la Figura 3-1 se muestra la gráfica generada por este sitio web, que visualiza la variación del consumo desde diciembre de 2019 hasta marzo de 2025.

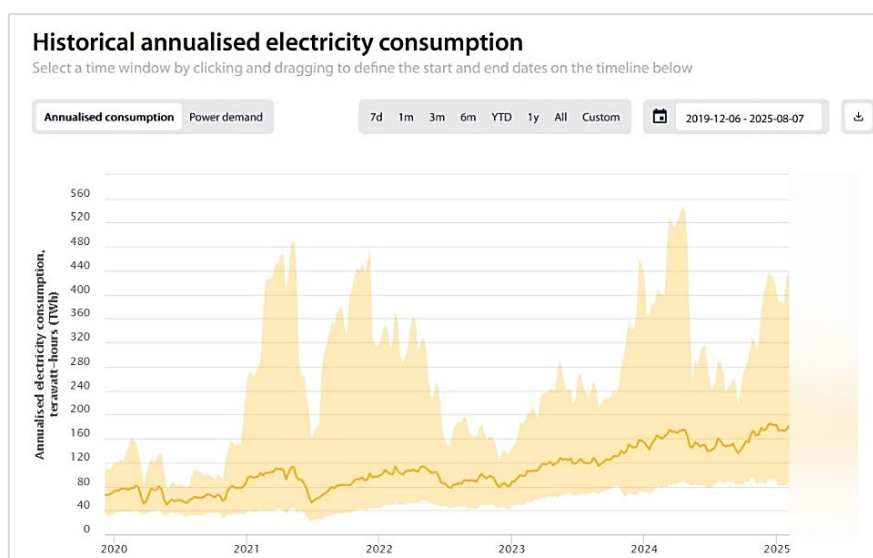


Figura 3-1. Consumo de energía eléctrica por la red Bitcoin en los últimos 5 años

Como se observa, el consumo energético anualizado ha presentado altibajos notables, con picos superiores a los 500 TWh/año (teravatios por año) entre mediados de 2021 y principios de 2022. Para obtener una visión más clara de su evolución, se aplica la técnica estadística de promedios móviles de 7 días, que suaviza los cambios bruscos en los datos. En el gráfico con los valores promediados semanalmente, se observa que, a partir de 2024, la demanda energética de la red Bitcoin tiende a estabilizarse en un rango de 120 a 160 TWh/año durante el período 2024-2025. Esta reducción refleja una mejora en la eficiencia de los equipos utilizados en la minería, como el Antminer S19 Pro (Cambridge Blockchain Network Sustainability Index, s.f.).

Estimaciones más exactas muestran que la minería de Bitcoin ha experimentado un aumento considerable en su consumo energético. Durante el período 2020-2021, la red utilizó 173 TWh de electricidad, lo que representó un 60 % más que en 2018-2019. En el período 2021-2022, el consumo anual superó los 100 TWh. Este crecimiento refleja la expansión global de la minería de Bitcoin y coloca a este sector entre los más intensivos en consumo de energía, con impactos ambientales significativos. Estos datos destacan el elevado consumo energético de la minería de Bitcoin, generando una importante huella de carbono, hídrica y territorial (Chamanara et al., 2023).

Otra forma de visualizar el consumo energético de la red Bitcoin es compararlo con el de países enteros. La Figura 3-2 presenta datos recopilados del sitio web de la Universidad de Cambridge correspondientes al año 2021, que estiman el consumo eléctrico anual de la red Bitcoin en 143 TWh. Este valor supera claramente el consumo de países como Noruega o Suiza. Como se observa en este gráfico, en 2021, el consumo de la red Bitcoin se acercaba al total de todos los centros de datos del mundo (Roa, 2021).

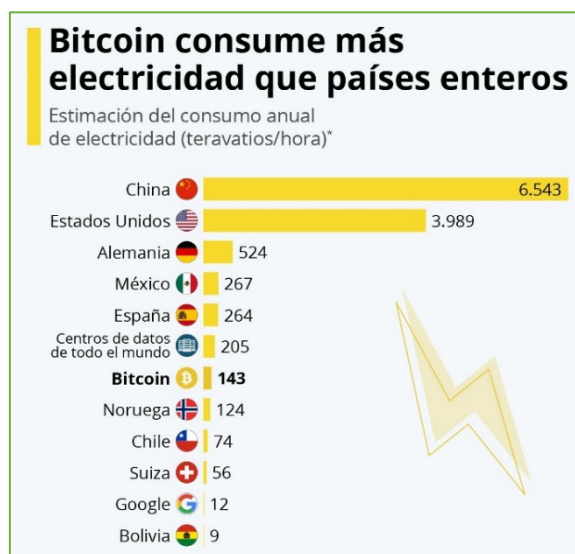


Figura 3-2. Comparación del consumo anual de electricidad de la red Bitcoin con algunos países (Roa, 2021)

Es interesante comparar el consumo estimado de 143 TWh para 2021 con el consumo total de electricidad de países más pequeños. Por ejemplo, en ese mismo año, el consumo eléctrico total de El Salvador fue de aproximadamente 6.5 TWh (6,530.70 GWh). Esto significa que el consumo global de la red Bitcoin fue aproximadamente 22 veces mayor que el de todo El Salvador en ese año. Esta comparación resalta el elevado consumo de recursos energéticos en la minería de Bitcoin, no solo con respecto a países desarrollados, sino también con países más pequeños (Ratings PCR, 2024).

3.1.1. Medición de potencia eléctrica consumida por el equipo ASIC

Con el objetivo de verificar los datos proporcionados por el fabricante del Antminer S19 Pro, presentados en la Tabla 2-1, se decidió adquirir un equipo de segunda mano a un precio considerablemente bajo, lo que permitió reducir drásticamente los costos de manejo y envío. Este equipo requería un voltaje de 220 voltios (V) y una potencia de 3,250 vatios (W), por lo que se aprovechó un espacio que ya contaba con un regulador de voltaje de alta potencia, lo que facilitó la instalación del equipo. En ese lugar no se disponía de un sistema de enfriamiento, por lo que se optó por la ventilación natural, abriendo las ventanas y, en ocasiones, utilizando ventiladores para controlar la temperatura. Todas las pruebas se realizaron bajo estas condiciones.

Para determinar el consumo eléctrico del Antminer S19 Pro, se utilizó un analizador de calidad de energía Fluke 435, un equipo de alta precisión que se muestra en la Figura 3-3. Este instrumento permite medir parámetros como voltaje, corriente, análisis de armónicos, potencia activa y aparente, frecuencia y factor de potencia, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para evaluar el comportamiento de equipos que consumen grandes cantidades de energía eléctrica, como los ASIC. Su portabilidad y compatibilidad con sistemas monofásicos y trifásicos lo hacen ideal para este tipo de pruebas (Fluke, s.f.).



Figura 3-3. (a) Conexión del Fluke 435 al sistema eléctrico del ASIC. (b) Vista de las mediciones registradas

Durante las primeras mediciones, se obtuvieron los valores instantáneos de voltaje y corriente. Se registró un voltaje eficaz (V_{rms}) de 223.57 V, y la corriente varió ligeramente entre las fases, oscilando

entre 15.4 y 15.6 A. La frecuencia se mantuvo constante en 60.01 Hz, lo que indica que el suministro eléctrico fue estable durante las pruebas. Con estos datos, se calculó la potencia eléctrica instantánea demandada por el ASIC.

$$P = V \times I = 223.57 \text{ V} \times 15.6 \text{ A} = 3,487.69 \text{ W} \approx 3.50 \text{ kW}$$

Este valor de 3.5 kW es aceptable, ya que, según la Tabla 2-1, el fabricante del Antminer S19 Pro especifica un consumo de 3.25 kW. Aunque la diferencia es relativamente pequeña, puede tener un impacto considerable en los costos operativos a largo plazo, ya que representa un incremento del 7 % en la potencia demandada, lo que podría resultar relevante en operaciones de minería a gran escala, con numerosos equipos ASIC.

3.1.2. Mediciones térmicas del equipo ASIC

El análisis térmico se llevó a cabo utilizando una cámara termográfica FLIR i7, que permite medir la temperatura superficial sin contacto mediante la detección de radiación infrarroja en un rango espectral de 7.5 a 13 μm . Este equipo tiene una resolución de 140 \times 140 píxeles, una sensibilidad térmica inferior a 0.1 $^{\circ}\text{C}$ y una precisión de ± 2 $^{\circ}\text{C}$, lo que lo hace especialmente útil para diversas aplicaciones en los sectores eléctrico e industrial. Su rango de medición térmica abarca desde -20 $^{\circ}\text{C}$ hasta $+250$ $^{\circ}\text{C}$. Durante el análisis, se obtuvieron imágenes térmicas, como la que se muestra en la Figura 3-4, que ilustran las mediciones realizadas (Flir Systems, s.f.).



Figura 3-4. (a) Vista térmica del Antminer S19 Pro. (b) Imagen térmica de los ventiladores y disipadores de calor, con una temperatura de 45.1 $^{\circ}\text{C}$

Lo primero que se hizo fue medir la temperatura de las conexiones eléctricas y del subtablero con el fin de detectar posibles sobrecalentamientos causados por la demanda de potencia del equipo ASIC. Además, se analizaron otras áreas clave del Antminer S19 Pro, como los ventiladores y disipadores de calor. Las mediciones indicaron una temperatura superficial máxima de 45.1 °C en las zonas cercanas a estos componentes, tal como se observa en la Figura 3-4. Aunque este valor se encuentra dentro del rango seguro de operación del ASIC, esto sugiere que sería conveniente mejorar la ventilación del lugar donde se encuentra el equipo, especialmente si este permanecerá allí durante toda su vida útil.

3.1.3. Mediciones registradas durante un período de 24 horas

Con el propósito de evaluar el desempeño del equipo ASIC en condiciones normales, se realizó un seguimiento durante 24 horas en el lugar previamente descrito. El 28 de febrero, se instaló el analizador de calidad de energía y se puso en marcha el Antminer S19 Pro, verificando que todas las conexiones estuvieran correctas y que se cumplieran las condiciones mínimas de seguridad. Al día siguiente, el 1 de marzo, se inspeccionaron nuevamente el subtablero, los tomacorrientes y los cables para asegurarse de que no estuvieran dañados por el calor, ya que las mediciones comenzaban ese día.

Las pruebas de operación se programaron para el fin de semana debido al ruido generado por el equipo ASIC, que resultaba molesto para las personas en los alrededores. El objetivo de las mediciones fue monitorear el consumo energético, la estabilidad operativa y la respuesta térmica del equipo. En la Figura 3-5 se muestra una fotografía de la instalación del analizador de calidad de energía Fluke 435 para las mediciones.



Figura 3-5. Vista del Fluke 435 en funcionamiento para las mediciones

Potencia promedio demandada durante un día

Para realizar las mediciones, se configuró el analizador Fluke 435 para registrar los datos cada segundo. El período de monitoreo comenzó el 1 de marzo de 2025 a las 10:45 a. m. y finalizó el 2 de marzo de 2025 a las 10:45 a. m., lo que permitió observar el efecto de la temperatura sobre el consumo energético a lo largo de ese período. El histograma de la Figura 3-6 muestra que la mayoría de los valores de potencia se encuentran entre 3,408 W y 3,420 W, con más de 800 registros dentro de este intervalo. Por lo tanto, se puede asumir un valor promedio de 3.5 kW para el Antminer S19 Pro.

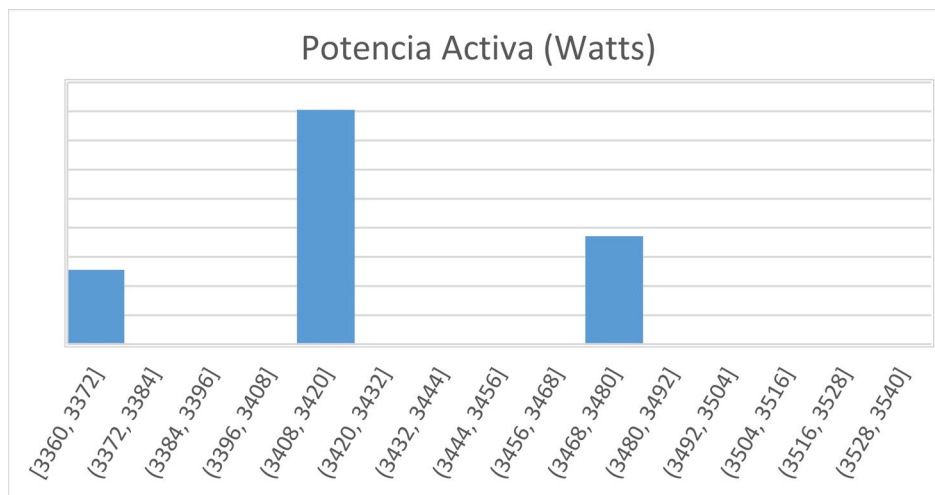


Figura 3-6. Valores de potencia activa más frecuente

Consumo energético durante un día

Durante las 24 horas de operación continua, el Antminer S19 Pro consumió un total de 81,855 Wh, equivalente a 81.86 kWh. La Figura 3-7 muestra el gráfico del consumo acumulado de energía durante el período de prueba. Con este dato, se pueden realizar estimaciones del consumo energético para períodos más largos, como meses o años. Además, este valor puede ajustarse según el número de unidades en operación; es decir, si se incorporan más equipos, el consumo total aumentará proporcionalmente.

Un dato relevante es que, durante el período de monitoreo, se verificó una red eléctrica estable, sin interrupciones ni variaciones significativas de voltaje, lo que permitió el funcionamiento continuo del equipo ASIC. De haber existido inestabilidad, habría sido necesario un UPS (Fuente de Alimentación Ininterrumpida, *Uninterruptible Power Supply*) para cubrir su demanda aproximada de 3.5 kW durante varias horas. Por ejemplo, para mantener operativo el equipo durante cortes de energía, el UPS debería contar con una capacidad mínima de almacenamiento de aproximadamente 7 kWh para dos horas.

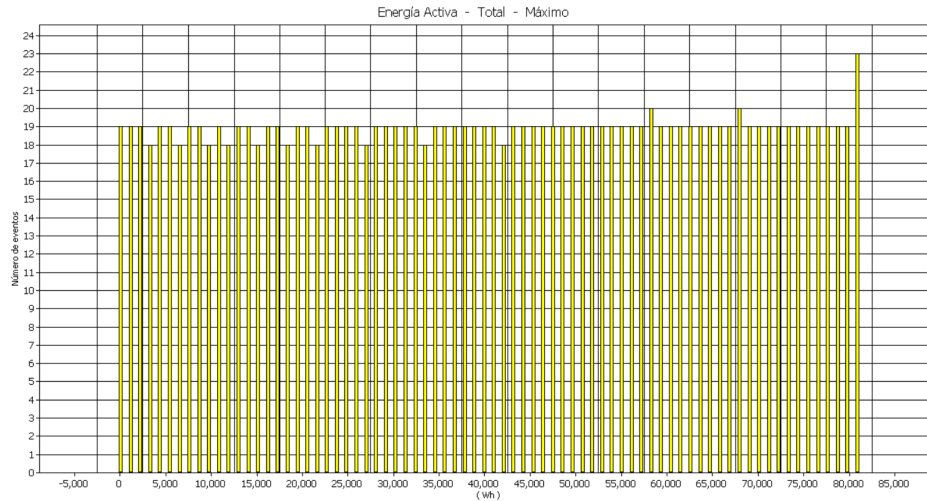


Figura 3-7. Energía total consumida por el equipo ASIC durante 24 horas

Eficiencia energética durante un día

Tal como se mencionó en el Capítulo 2, la eficiencia energética se mide en julios por terahash (J/TH), lo que indica cuántos *Joules* de energía se requieren para procesar un terahash de datos. Esta medida permite comparar el rendimiento energético entre diferentes modelos de equipos ASIC, y lo ideal es que el valor sea lo más bajo posible, ya que esto indica una mayor eficiencia. Según la Tabla 2-1, el Antminer S19 Pro tiene una eficiencia energética de 29.5 J/TH.

La eficiencia energética, definida como la cantidad de energía consumida por unidad de *hash*, para el Antminer S19 Pro, puede calcularse utilizando el consumo real de 81,855 Wh durante 24 horas, con una *tasa de hash* proporcionada por el fabricante de 110 TH/s. Sin embargo, durante las pruebas, esta *tasa de hash* varió, alcanzando en ocasiones los 112 TH/s.

Primero, se convierte el valor de la energía total a *Joules*:

$$1 J = W \cdot s \quad o \quad 1 Wh = 3600 J$$

$$E_{total} = 81,855 Wh \times 3600 J/Wh = 294,678,000 J$$

Luego, se determina el total de hashes realizados durante las 24 horas (86,400 s):

$$110 TH/s \times 86,400 s = 9,504,000 TH$$

Finalmente, la eficiencia promedio de todo el día se calcula de la siguiente manera:

$$Eficiencia = \frac{Energía consumida}{hashes realizados} = \frac{294,678,000 J}{9,504,000 TH} \approx 31.0 J/TH$$

Este valor de eficiencia de 31.0 J/TH es ligeramente superior a los 29.5 J/TH especificados por el fabricante. Aunque la diferencia es mínima, implica un consumo energético mayor para alcanzar la misma *tasa de hash*. En operaciones de minería a gran escala, pequeñas variaciones en la eficiencia energética pueden tener un impacto considerable en los costos operativos. Por eso, es fundamental validar los datos del fabricante en condiciones reales de operación, ya que algunas especificaciones del equipo ASIC pueden variar en la práctica.

Resultados adicionales

Es importante resaltar otras observaciones hechas durante el período de prueba. A lo largo de las 24 horas de monitoreo, el equipo operó de manera continua, sin necesidad de reinicios ni problemas técnicos. La frecuencia del suministro eléctrico se mantuvo estable, cercana a los 60 Hz, mientras que el voltaje fluctuó ligeramente entre 223.4 y 224.1 V. No se registraron caídas de voltaje ni sobrevoltajes que pudieran afectar el funcionamiento del equipo ASIC. Además, no hubo disparos de protecciones ni desconexiones, lo que resultó muy beneficioso para llevar a cabo las pruebas según lo planificado.

En cuanto a la corriente absorbida por el equipo, esta se mantuvo entre 15.2 y 15.7 A, lo que confirma la estabilidad de la red eléctrica durante todo el ciclo de pruebas. Este comportamiento es fundamental para garantizar la rentabilidad de las operaciones de minería, ya que asegura la continuidad sin interrupciones, las cuales podrían generar penalizaciones en los *pools de minería*, maximizando así la productividad del equipo.

3.1.4. Impacto de la temperatura ambiente en el rendimiento

La temperatura ambiente influye significativamente en el funcionamiento de los equipos ASIC, razón por la cual los fabricantes recomiendan un rango óptimo de operación entre 0 °C y 40 °C. Esta variable ambiental afecta directamente el comportamiento térmico del equipo, influye en el funcionamiento de los ventiladores y, en consecuencia, incide en el consumo energético del proceso de minería.

Horas de menor temperatura ambiente

Las temperaturas más bajas favorecen el rendimiento de los equipos ASIC. Durante el período comprendido entre las 00:00 y las 05:00 horas, se registró una disminución de la temperatura exterior, lo que redujo la carga térmica interna del equipo. En este intervalo, la temperatura de los chips descendió a 71.5 °C, lo que permitió que los ventiladores operaran a menor velocidad. Como resultado, la eficiencia energética mejoró, alcanzando un valor de 29.97 J/TH, muy cercano al especificado por el fabricante.

Además, mediante la interfaz de monitoreo de *Braiins OS*, se observó un incremento en la *tasa de hash* hasta 112.8 TH/s, lo que resalta la importancia de controlar la temperatura ambiente para maximizar el rendimiento del equipo. Este comportamiento fue registrado a las 3:17 a. m., como se muestra en la Figura 3-8. En ese momento, la potencia demandada por el equipo era de 3.38 kW.

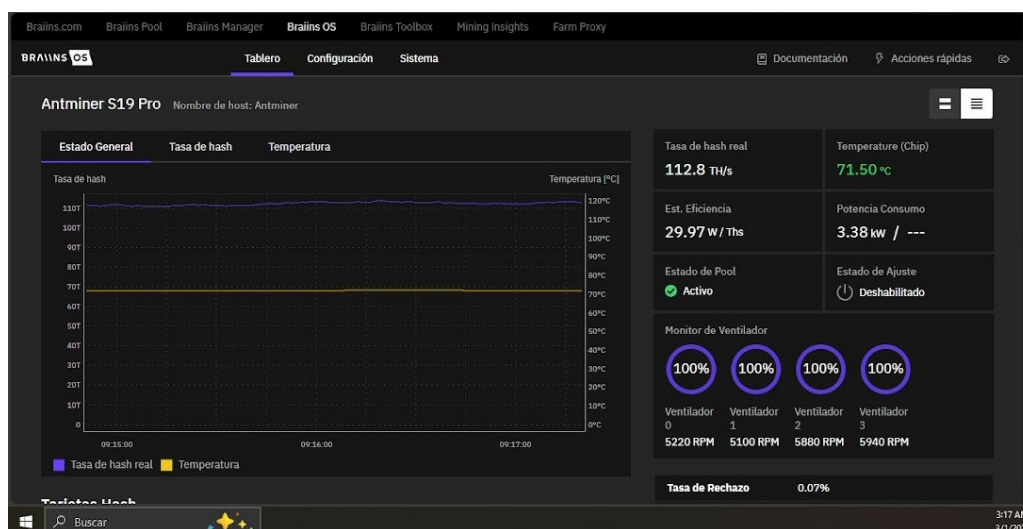


Figura 3-8. Temperatura mínima registrada en los chips cerca de las 3:00 a. m.

Horas de mayor temperatura ambiente

Durante las horas de mayor radiación solar, especialmente entre 12:00 y 17:00 horas, se observó un incremento en la temperatura ambiente, lo que elevó la temperatura interna del equipo. En este periodo, los chips alcanzaron una temperatura de 78 °C, lo que obligó al sistema de ventilación a operar a su máxima capacidad. Esta mayor exigencia provocó un aumento en la demanda de potencia, que llegó a 3.44 kW.

Como consecuencia, la eficiencia energética disminuyó levemente hasta 30.67 J/TH. Sin embargo, la *tasa de hash* se mantuvo estable en 112.3 TH/s, lo que sugiere que, a pesar de la ligera caída en

eficiencia, el rendimiento general del equipo no se vio afectado. Estos datos, que se muestran en la Figura 3-9, fueron registrados alrededor de las 3:00 p. m.

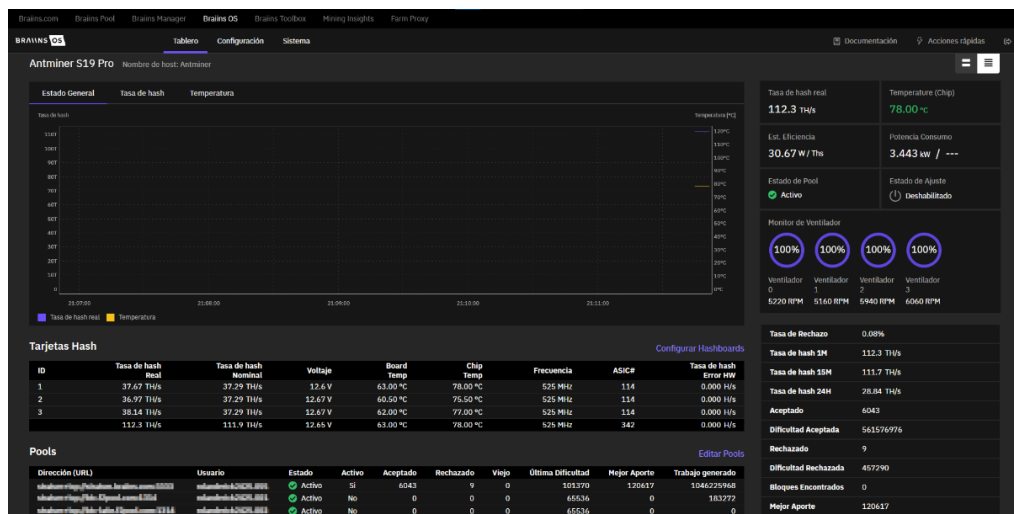


Figura 3-9. Temperatura máxima registrada en los chips cerca de las 3:00 p. m.

3.2. Costo de la energía eléctrica para minar Bitcoin

El Antminer S19 Pro ofrece una alta rentabilidad gracias a su eficiencia energética y elevada *tasa de hash*. Sin embargo, esta rentabilidad puede verse afectada por diversos factores, como la *dificultad de la red*, el precio del Bitcoin, las comisiones de los *pools de minería* y, especialmente, el costo de la electricidad. Este último factor constituye uno de los principales gastos operativos en la minería, por lo que cualquier variación en las tarifas eléctricas puede impactar directamente en la viabilidad económica de esta actividad.

A medida que el precio de la energía eléctrica aumenta, los costos operativos se elevan, reduciendo las ganancias, incluso si el precio del Bitcoin se mantiene por encima de los US\$ 100,000, nivel alcanzado a inicios de 2025. Por lo tanto, para quienes deseen iniciarse en la minería, resulta fundamental evaluar cuidadosamente el costo de la energía eléctrica, ya que puede ser el factor determinante entre obtener ganancias o incurrir en pérdidas (StatMuse, s.f.-a).

Además, las fluctuaciones en las tarifas eléctricas pueden ser críticas en ciertos escenarios, especialmente cuando están vinculadas a la disponibilidad de energía renovable. Por ejemplo, en regiones donde esta representa una parte importante de la matriz energética, los precios pueden variar considerablemente debido a factores estacionales o climáticos que afectan la producción.

De esta manera, en lugares donde es viable implementar soluciones energéticas autónomas, como una planta solar fotovoltaica dedicada exclusivamente a la minería, el costo energético puede estabilizarse. Esto no solo reduce la dependencia de fuentes convencionales, sino que también ofrece una ventaja competitiva a largo plazo, al disminuir los gastos variables y mejorar la sostenibilidad de las operaciones (Wang *et al.*, 2024).

3.2.1. Precio de la energía eléctrica en El Salvador

El precio de la electricidad es un factor clave para la economía de un país y su desarrollo industrial, incluida la minería de criptomonedas. En El Salvador, la matriz energética se compone de fuentes renovables, como la geotérmica y la hidroeléctrica, y no renovables, como los productos derivados del petróleo. La disponibilidad de estas fuentes influye directamente en las tarifas eléctricas: si las condiciones de generación no son favorables, los costos de producción aumentan, lo que afecta el precio final de la electricidad.

En general, las tarifas eléctricas pueden variar por razones políticas y económicas, así como por la intermitencia de fuentes renovables como la solar y la eólica. Sin embargo, en El Salvador, la generación geotérmica se ha mantenido relativamente estable en los últimos años, representando entre el 18 % y el 21 % de la energía consumida en el país. Esta estabilidad ha permitido que los costos de generación se mantengan constantes, lo que contribuye a que el precio de la electricidad proveniente de esta fuente no sufra grandes fluctuaciones (Dirección General de Estadísticas y Geografía de El Salvador, 2024).

A lo largo del tiempo, los países centroamericanos, incluido El Salvador, han experimentado alzas en las tarifas eléctricas, lo que afecta la competitividad de actividades intensivas en energía, como la minería de criptomonedas. La Figura 3-10 muestra cómo han evolucionado los precios promedio anuales del servicio eléctrico al consumidor final entre 1998 y 2015 en varios países de la región. Se observa una tendencia ascendente, especialmente en Guatemala y El Salvador, mientras que otros países han tenido aumentos más moderados. Este aumento sostenido indica que existen factores estructurales comunes en la región que influyen en el costo de la electricidad (Intendencia Económica, s.f.).

En el caso particular de El Salvador, el gráfico muestra que entre 2004 y 2014 el precio promedio anual de la electricidad prácticamente se duplicó. Por esta razón, quienes emprenden actividades económicas a largo plazo, como la minería de Bitcoin, deben considerar que una variación en el precio

de la electricidad de esta magnitud puede afectar seriamente la rentabilidad, dado que la recuperación de la inversión puede requerir varios años.

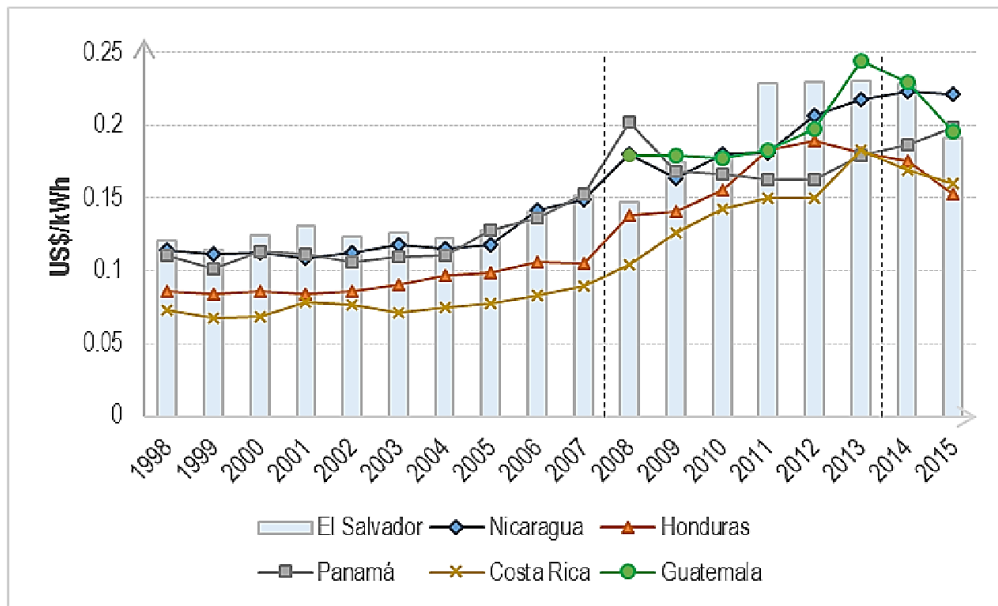


Figura 3-10. Precios promedio anual del servicio eléctrico en Centroamérica, de 1998 a 2015

Ante la incertidumbre de los precios de la electricidad a largo plazo, la construcción de plantas solares fotovoltaicas dedicadas a la minería surge como una solución viable para operar con mayor independencia del mercado eléctrico. Este tipo de instalación permite la autogeneración de energía limpia, lo que reduce la dependencia de fuentes convencionales y puede traducirse en menores costos operativos, aumentando así la rentabilidad del proyecto.

La regulación salvadoreña establece una clasificación tarifaria basada en la demanda de potencia y en la tensión del suministro de energía. Las categorías tarifarias incluyen pequeña demanda (demanda máxima mensual ≤ 10 kW), mediana demanda (> 10 kW y ≤ 50 kW) y gran demanda (> 50 kW). Además, el suministro se clasifica en dos categorías de tensión: baja tensión (BT), que abarca voltajes menores o iguales a 600 V, y media tensión (MT), para voltajes superiores a 600 V e inferiores a 115,000 V (AES El Salvador, s.f.).

En El Salvador, las tarifas eléctricas residenciales para pequeñas demandas en baja tensión varían entre US\$ 0.146958 y US\$ 0.204809 por kWh, según el pliego tarifario vigente para el trimestre de mayo a julio de 2025, como se muestra en la Tabla 3-1. Esta diferencia de casi US\$ 0.06 se debe a las políticas tarifarias particulares de las distintas empresas distribuidoras. Al comparar los pliegos correspondientes a julio de 2024 y julio de 2025, se observa que el cargo de energía se mantuvo sin

cambios en ese período específico, lo cual se atribuye a un decreto legislativo que congeló los ajustes tarifarios trimestrales como medida de alivio económico para la población salvadoreña. Esta política fue complementada con subsidios para los hogares de bajo consumo (SIGET, s.f.-a).

Sin embargo, las tarifas pueden cambiar rápidamente debido a varios factores: reducción del caudal en las presas hidroeléctricas, agotamiento de reservorios geotérmicos, fluctuaciones en los precios del petróleo, o decisiones políticas relacionadas con generación y distribución energética. Un ejemplo de esta variabilidad se aprecia al comparar las tarifas residenciales entre julio de 2023 y julio de 2024. Si se toma como referencia la tarifa residencial de CAESS, se observa que esta pasó de 0.155505 US\$/kWh a 0.192553 US\$/kWh, lo que representó un incremento del 23 % en solo un año (SIGET, s.f.-b).

SUPERINTENDENCIA GENERAL DE ELECTRICIDAD Y TELECOMUNICACIONES									
PLIEGO TARIFARIO									
PRECIOS MÁXIMOS PARA EL SUMINISTRO ELÉCTRICO									
VIGENTES A PARTIR DEL 01 DE MAYO AL 31 DE JULIO DE 2025									
I. PEQUEÑAS DEMANDAS (0 < kW ≤ 10)									
BAJA TENSION									
a) Tarifa Residencial para consumos menores de 99 kWh/mes - BT									
Bloque 1: Primeros 99 kWh/mes									
		CAESS	DEL SUR	CLESA	EEO	DEUSEM	EDESAL	B&D	DEC
Cargo de Comercialización:									
Cargo Fijo	US\$/Usuario-mes	0.867998	1.015107	0.786919	0.923566	0.821532	1.566566	0.867936	1.031851
Cargo de Energía:									
Cargo Variable	US\$/kWh	0.192553	0.184249	0.193040	0.192012	0.204809	0.171224	0.178283	0.146958
Cargo de Distribución:									
Cargo Variable	US\$/kWh	0.032119	0.051952	0.065141	0.069640	0.081671	0.066055	0.040568	0.039656
Bloque 2: Consumos entre 100 kWh/mes y 199 kWh/mes									
		CAESS	DEL SUR	CLESA	EEO	DEUSEM	EDESAL	B&D	DEC
Cargo de Comercialización:									
Cargo Fijo	US\$/Usuario-mes	0.867998	1.015107	0.786919	0.923566	0.821532	1.566566	0.867936	1.031851
Cargo de Energía:									
Cargo Variable	US\$/kWh	0.192662	0.183496	0.192352	0.192838	0.204959	0.168938	0.178399	0.146277
Cargo de Distribución:									
Cargo Variable	US\$/kWh	0.036437	0.065378	0.030477	0.037589	0.040471	0.117081	0.035955	0.043405
Bloque 3: Consumos mayores o iguales a 200 kWh/mes									
		CAESS	DEL SUR	CLESA	EEO	DEUSEM	EDESAL	B&D	DEC
Cargo de Comercialización:									
Cargo Fijo	US\$/Usuario-mes	0.867998	1.015107	0.786919	0.923566	0.821532	1.566566	0.867936	1.031851
Cargo de Energía:									
Cargo Variable	US\$/kWh	0.190757	0.182482	0.191389	0.192371	0.204123	0.169424	0.178399	0.145669
Cargo de Distribución:									
Cargo Variable	US\$/kWh	0.048087	0.080377	0.090206	0.085280	0.091716	0.137529	0.037964	0.045186

Tabla 3-1. Pliego tarifario vigente de mayo a julio de 2025 para pequeñas demandas

Esta actualización trimestral de tarifas eléctricas se divide en bloques según la potencia demandada y la dinámica interna de las distribuidoras. En la Tabla 3-1 se presentan únicamente las tarifas residenciales para baja tensión en pequeñas demandas, diferenciadas en tres bloques de consumo: menos de 99 kWh/mes, entre 100 y 199 kWh/mes, y 200 kWh/mes o más. Aunque, el pliego completo incluye otros bloques, como baja tensión para demandas de hasta 50 kW, tarifas horarias para baja tensión y media tensión, entre otros.

Para los inversionistas interesados en la minería de criptomonedas, una opción interesante podría ser la compra directa de energía a los generadores, lo que permitiría acceder a precios más bajos en comparación con las tarifas estándar del mercado. En 2022, una investigación periodística reveló que el costo de generación de energía geotérmica en El Salvador era de 0.09 US\$/kWh, lo que la convierte en una alternativa atractiva para quienes buscan reducir sus costos operativos y garantizar la rentabilidad (El Faro, 2022).

Otra opción es adquirir la energía directamente en el Mercado Mayorista de Electricidad (MME). En 2024, el precio promedio de la electricidad en el MME fue de 0.11 US\$/kWh. Aunque este precio es competitivo, negociar directamente con los generadores podría resultar aún más rentable para un proyecto de minería de criptomonedas a gran escala, ya que permitiría obtener precios más bajos y un suministro constante y confiable, lo cual es esencial para una operación continua (Unidad de Transacciones, s.f.).

3.2.2. Precio de la energía eléctrica a nivel mundial

El precio de la electricidad varía considerablemente entre países, principalmente debido a las fuentes utilizadas para su generación y a las políticas energéticas implementadas. Un ejemplo destacado es Islandia, donde la abundancia de energía geotérmica, producto de su actividad volcánica, permite mantener tarifas relativamente bajas. Para diciembre de 2024, el precio de la electricidad para los hogares era de 0.189 US\$/kWh y 0.095 US\$/kWh para los negocios. Islandia es uno de los pocos países europeos con una economía desarrollada que puede ofrecer precios de electricidad tan bajos, gracias a su matriz energética compuesta casi en su totalidad por fuentes renovables (GlobalPetrolPrices.com, s.f.-a).

En contraste, en países como Alemania, que atraviesan una transición energética hacia la descarbonización (*Energiewende*), las tarifas son considerablemente más altas. A finales de 2024, Alemania registraba uno de los precios más elevados de electricidad en Europa, con un promedio de 0.45 US\$/kWh. Este incremento se debe, en parte, al cierre progresivo de plantas de carbón y nucleares, así como a las fuertes inversiones en energías renovables y en la adaptación de la red eléctrica para gestionar fuentes intermitentes como la solar y la eólica. Además, Alemania busca alcanzar la neutralidad en carbono para 2045, lo que implica una transformación profunda de su matriz energética y la aceleración de la implementación de tecnologías limpias (Reuters.com, s.f.).

En Estados Unidos, los precios de la electricidad varían según el estado. Por ejemplo, en California, un referente en energía limpia, las tarifas pueden superar los 0.30 US\$/kWh, debido a los altos costos de infraestructura y regulaciones ambientales estrictas. Por otro lado, en Missouri, donde predomina el uso de carbón y gas natural, el precio promedio es de apenas 0.11 US\$/kWh, reflejando los menores costos asociados a fuentes no renovables, aunque más contaminantes. La Tabla 3-2 resume los precios promedio de electricidad para hogares en varios países, junto con sus principales fuentes de energía, con datos actualizados para 2024 (Minasian-Koncewicz, 2025).

País	Precio promedio (US\$/kWh)	Fuente principal de energía
Alemania	0.45	Renovables (solar, eólica), carbón y gas natural
España	0.28	Renovables (solar, eólica), gas natural y nuclear
Islandia	0.19	Renovables (hidroeléctrica y geotérmica)
Estados Unidos	0.17	Mezcla: gas natural, renovables, carbón y nuclear
Japón	0.29	Gas natural, nuclear y renovables
Emiratos Árabes Unidos	0.08	Gas natural y energía solar

Tabla 3-2. Precio promedio de electricidad para hogares en 2024 (GlobalPetrolPrices.com, s.f.-b)

Según los datos presentados, se observa que los países que generan energía a partir de recursos fósiles propios, como el gas natural o el carbón, y que no dependen de importaciones, suelen ofrecer tarifas más competitivas, aunque esto implique mayores emisiones de gases de efecto invernadero.

En cambio, los países que han intensificado su transición a energías renovables enfrentan tarifas más altas debido a los costos iniciales de infraestructuras como parques eólicos y plantas solares, así como al mantenimiento y la gestión de la intermitencia. Además, las regulaciones ambientales estrictas aumentan aún más los costos. No obstante, existen excepciones como Islandia, donde la disponibilidad local de energía geotérmica e hidroeléctrica permite mantener tarifas bajas.

En la mayoría de los países, el precio de la electricidad representa un factor clave tanto para el sector residencial como industrial. En el caso de El Salvador, el costo energético es relativamente bajo en comparación con países como Alemania, España o Japón, lo que puede convertir al país en un destino competitivo para la minería de Bitcoin. Sin embargo, los precios pueden fluctuar según la disponibilidad de las fuentes de generación, las condiciones climáticas y las decisiones regulatorias, lo que evidencia

la importancia de considerar el precio de la electricidad como una variable crítica para evaluar la viabilidad de proyectos de minería a largo plazo.

En este contexto, la diversificación de las fuentes de energía, especialmente mediante la implementación de plantas solares fotovoltaicas, puede representar una ventaja estratégica. Países con altos niveles de radiación solar, como los de Centroamérica, tienen una oportunidad única para aprovechar esta fuente renovable no solo en el ámbito residencial e industrial, sino también para aplicaciones en minería de criptomonedas. Su uso permitiría a los mineros acceder a tarifas eléctricas más predecibles y estables, reduciendo la dependencia del mercado eléctrico tradicional y evitando los riesgos asociados con la volatilidad de precios. Esto contribuiría a mejorar la rentabilidad y sostenibilidad de las operaciones mineras a largo plazo.

3.3. Países con mayor presencia en minería de criptomonedas

La minería de Bitcoin y otras criptomonedas ha experimentado un crecimiento notable en los últimos años, pasando de ser una actividad secundaria para convertirse en una industria global multimillonaria. Los países más involucrados han aprovechado factores como recursos energéticos abundantes, infraestructura tecnológica avanzada y políticas gubernamentales favorables, consolidándose como líderes del mercado. Los cambios en las políticas energéticas y regulaciones ambientales han impactado la competitividad, mientras que la estabilidad y claridad del marco regulatorio, ya sea favorable o restrictivo, han sido clave para el desarrollo y consolidación de esta industria.

Los países que favorecen las criptomonedas suelen contar con políticas fiscales atractivas, marcos jurídicos claros y un sólido apoyo a la innovación tecnológica. Por ejemplo, impuestos bajos o nulos sobre las ganancias derivadas de la minería crean un entorno propicio para los inversionistas. Además, la seguridad jurídica con reglas claras fomenta un ambiente dinámico que beneficia tanto a grandes corporaciones como a pequeñas empresas del sector (Lincoln & Partner, 2024).

Actualmente, solo unos pocos países se han posicionado como líderes en minería de criptomonedas, medido por la *tasa de hash global* (o *hashrate global*). La Figura 3-11 muestra la distribución mundial de la minería de Bitcoin en 2024, donde Estados Unidos lidera con un 37 %, seguido por China (20 %) y Kazajistán (13 %), sumando estos tres países el 70 % del total de *la tasa de hash global*. Otros países con presencia significativa incluyen Rusia, Canadá y Alemania.

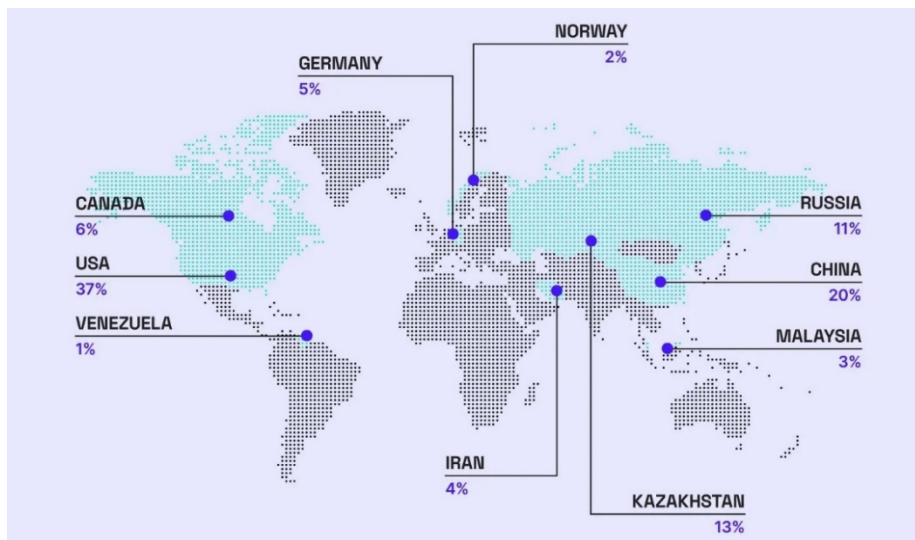


Figura 3-11. Distribución mundial de la minería de Bitcoin en 2024 (Miah, 2025)

A continuación, se describen los cinco países con mayor participación en la minería de Bitcoin, destacando cómo factores políticos, económicos y la disponibilidad de recursos energéticos influyen en la ubicación de estas plantas de minería (Miah, 2025).

- China: El gigante hasta 2021

Durante años, China fue un líder indiscutible en la minería de Bitcoin, alcanzando entre el 65 % y el 75 % de la *tasa de hash global*. Su dominio se basaba principalmente en el acceso a energía hidroeléctrica barata en regiones como Sichuan y Xinjiang. Sin embargo, la prohibición de la minería en 2021 redujo su participación al 20 %. A pesar de esto, muchos mineros continúan operando de manera clandestina y China sigue siendo clave en la cadena de suministro de equipos, manteniendo su importancia en el sector.

- Estados Unidos: El nuevo líder global

Después de la prohibición de la minería en China, Estados Unidos se consolidó como el nuevo líder mundial, alcanzando más del 37 % de la *tasa de hash global* desde 2021. Esto se debe a su acceso a energía barata, especialmente en estados como Texas, Wyoming y Georgia, que combinan fuentes renovables, como la solar y la eólica, con grandes reservas de gas natural. Además, el marco regulatorio favorable y las políticas fiscales atractivas han impulsado la

industria. Los mineros han invertido en equipos de última generación con alta eficiencia, lo que, sumado a los bajos precios de la electricidad, ha hecho que la minería sea rentable.

- Kazajistán: Un destino atractivo en Asia Central

Kazajistán aporta alrededor del 13 % de la *tasa de hash global*, debido a sus bajos costos eléctricos y un entorno inicialmente favorable para la minería. Empresas como BTC.com y Binance Pool han operado allí, atrayendo inversiones considerables. Sin embargo, el rápido crecimiento del sector provocó sobrecargas en la red eléctrica y apagones frecuentes, lo que llevó al gobierno a imponer regulaciones más estrictas. A pesar de estos desafíos, la capacidad energética instalada y los bajos costos de operación mantienen al país como un destino atractivo para la minería de criptomonedas.

- Rusia: Crecimiento impulsado por sus recursos energéticos

Rusia representa alrededor del 11 % de la *tasa de hash global*, gracias a ventajas como tarifas eléctricas bajas y un clima frío que facilita el enfriamiento natural de los equipos, especialmente en Siberia. Además, el país aprovecha sus abundantes recursos energéticos, como el gas natural, la energía nuclear y la hidroeléctrica. No obstante, las sanciones internacionales y las tensiones geopolíticas limitan su acceso a tecnología y financiamiento; aun así, sigue siendo un participante clave en la minería.

- Canadá: Minería sostenible en ascenso

Canadá mantiene una participación del 6 % en la *tasa de hash global*, destacándose por su enfoque sostenible. La energía hidroeléctrica es su principal fuente, lo que permite operaciones con un menor impacto ambiental. Además, el gobierno canadiense ha optado por colaborar con la industria en lugar de imponer restricciones severas, ofreciendo un entorno regulatorio estable y atractivo para los inversionistas. Canadá demuestra que es posible ser competitivo sin sacrificar la sostenibilidad.

La minería de criptomonedas no depende únicamente de la disponibilidad de energía barata, sino también de factores como la estabilidad política, las políticas gubernamentales y la calidad de la infraestructura eléctrica. Países como Estados Unidos, China, Kazajistán, Rusia y Canadá han liderado esta industria gracias a condiciones favorables en estos factores. No obstante, el panorama está evolucionando. Actualmente, no solo importa el costo de la electricidad, sino también su origen. La presión global por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ha puesto en primer plano la necesidad de utilizar fuentes de energía sostenibles.

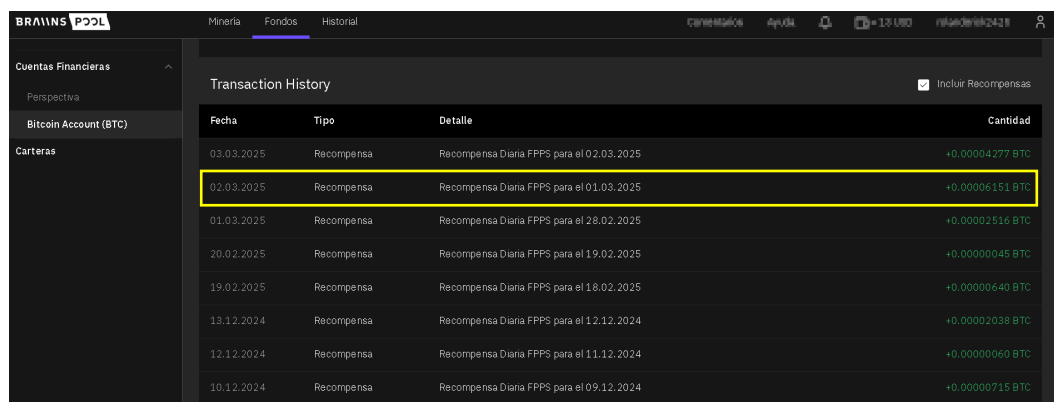
Por lo tanto, el futuro de la minería de Bitcoin dependerá de la capacidad de los países para equilibrar la rentabilidad económica con la responsabilidad ambiental. Así, los mineros que deseen mantenerse competitivos deberán considerar no solo los costos energéticos, sino también los marcos regulatorios y el impacto ambiental de sus operaciones.

3.4. Evaluación de los costos operativos y energéticos del Antminer S19 Pro

El Antminer S19 Pro, desarrollado por la empresa china Bitmain, es uno de los equipos más avanzados y eficientes para la minería de Bitcoin. En esta sección se analizan los costos energéticos y operativos asociados a su funcionamiento, con especial atención a su impacto en la rentabilidad en el contexto salvadoreño.

3.4.1. Ingresos generados por la minería de Bitcoin

Durante un período de 24 horas, se registró el consumo energético del Antminer S19 Pro en condiciones reales de operación. En ese tiempo, el equipo generó 0.00006151 BTC, según datos obtenidos directamente de *Braiiins Pool*, como se muestra en la Figura 3-12. Esto equivalía a US\$ 5.23 diarios, basado en un precio promedio de Bitcoin de US\$ 85,000 en marzo de 2025. Para calcular este valor, se multiplicó el precio de Bitcoin por la cantidad generada en ese período. Al multiplicar US\$ 5.23 por 30 días, se estima un ingreso mensual de US\$ 156.85 (StatMuse, s.f.-b).



Fecha	Tipo	Detalle	Cantidad
03.03.2025	Recompensa	Recompensa Diaria FPPS para el 02.03.2025	+0.00004277 BTC
02.03.2025	Recompensa	Recompensa Diaria FPPS para el 01.03.2025	+0.00006151 BTC
01.03.2025	Recompensa	Recompensa Diaria FPPS para el 28.02.2025	+0.00002516 BTC
20.02.2025	Recompensa	Recompensa Diaria FPPS para el 19.02.2025	+0.00000045 BTC
19.02.2025	Recompensa	Recompensa Diaria FPPS para el 18.02.2025	+0.00000640 BTC
13.12.2024	Recompensa	Recompensa Diaria FPPS para el 12.12.2024	+0.00002038 BTC
12.12.2024	Recompensa	Recompensa Diaria FPPS para el 11.12.2024	+0.00000060 BTC
10.12.2024	Recompensa	Recompensa Diaria FPPS para el 09.12.2024	+0.00000715 BTC

Figura 3-12. Recompensa obtenida de la minería de Bitcoin durante un día completo

Sin embargo, considerando una tarifa eléctrica de 0.19 US\$/kWh, el costo de la energía supera los ingresos generados, lo que conduce a pérdidas. Esta estimación fue realizada utilizando una calculadora en línea en marzo de 2025, en el sitio web ASICMinerValue, tomando en cuenta las características del

Antminer S19 Pro y el precio del Bitcoin en ese momento. En la Figura 3-13 se muestra que la calculadora estimó ingresos diarios de US\$ 5.22, una cifra ligeramente inferior en comparación con el resultado basado en las mediciones, que fue de US\$ 5.23 (ASICMinerValue, s.f.).

Es importante destacar que estos ingresos son solo estimaciones basadas en rendimientos pasados. Los valores reales pueden variar debido a factores como la volatilidad del precio de Bitcoin, el aumento de la *dificultad de la red* y los eventos de *halving*, que reducen periódicamente las recompensas para los mineros. Esto destaca lo difícil que es predecir con exactitud la rentabilidad de esta actividad.

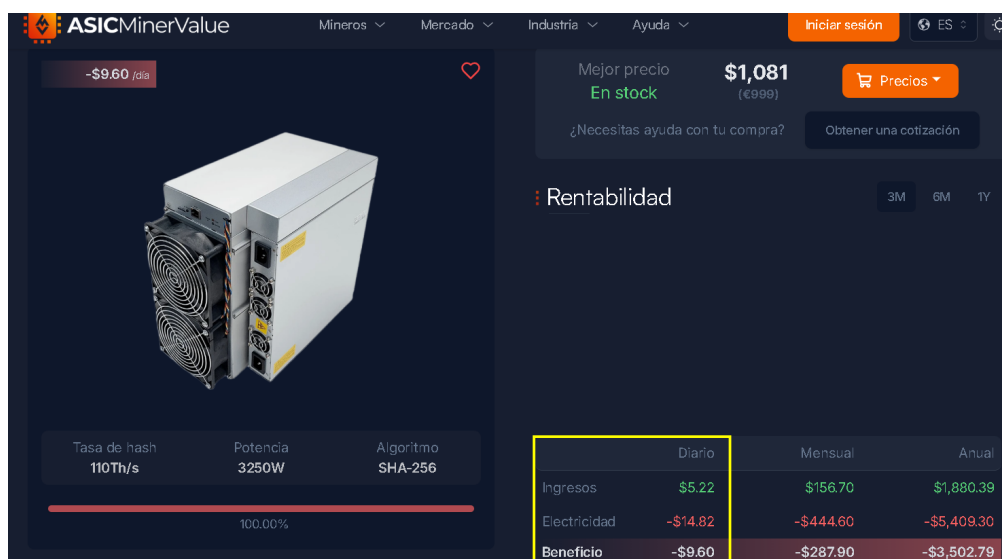


Figura 3-13. Estimación de ganancias con el Antminer S19 Pro (ASICMinerValue, s.f.)

Realizando un análisis sencillo, similar al del sitio web mencionado antes, y utilizando los datos de consumo medido del equipo (81.855 kWh/día) junto con el cargo de energía residencial de CAESS (0.192553 US\$/kWh), se estima un costo diario de electricidad de aproximadamente US\$ 15.76, lo que equivale a US\$ 472.84 mensuales.

El flujo neto resultante se calcula así:

$$\text{Flujo neto diario} = \text{US\$ } 5.23 - \text{US\$ } 15.76 = -10.53 \text{ US\$/día}$$

$$\text{Flujo neto mensual} = \text{US\$ } 156.85 - \text{US\$ } 472.84 = -315.99 \text{ US\$/mes}$$

Este cálculo refleja una pérdida constante, que coincide en gran medida con las estimaciones obtenidas mediante herramientas en línea. Sin embargo, para estimar el costo total de la electricidad en El Salvador de manera más precisa, es necesario considerar otros cargos establecidos en el pliego tarifario, los cuales se analizarán en la siguiente sección.

3.4.2. Análisis del consumo energético

Como se mencionó anteriormente, el Antminer S19 Pro tiene una demanda promedio de 3.25 kW, aunque las mediciones realizadas indicaron un consumo cercano a 3.5 kW. Además, durante un día completo de operación, se registró un consumo energético de 81.855 kWh. Con base en estos datos, se calculará el costo energético diario y mensual utilizando las tarifas del pliego tarifario vigente, detallado en la Tabla 3-1.

Según dicho pliego, el cargo de energía en el sector residencial para pequeñas demandas y baja tensión es de 0.192553 US\$/kWh. La Tabla 3-3 incluye este cargo y añade los costos de comercialización, distribución e IVA (Impuesto al Valor Agregado), lo que permite obtener un cálculo más preciso del costo mensual de operación de un equipo ASIC.

Consumo eléctrico diario: 81.855 kWh/día

Consumo eléctrico mensual: 81.855 kWh/día × 30 días = 2,455.65 kWh/mes

Bloque	Consumo (kWh/mes)	Cargo de Energía (US\$/kWh)	Cargo de Distribución (US\$/kWh)	Subtotal (US\$)
Bloque 1: Primeros 99 kWh/mes	99	0.192553	0.032119	22.24
Bloque 2: 100-199 kWh/mes	100	0.192662	0.036437	22.91
Bloque 3: ≥ 200 kWh/mes	2,256.65	0.190757	0.048087	538.99
Cargo de comercialización (0.867998 US\$/Usuario-mes)				0.87
TOTAL				585.01
IVA (13%)				76.05
TOTAL CON IVA				661.06

Tabla 3-3. Cálculo de costos energéticos para pequeñas demandas

Con base en estos datos, el costo mensual de electricidad para operar un solo Antminer S19 Pro en El Salvador, bajo la tarifa de pequeñas demandas en baja tensión, supera los US\$ 600.00, lo que equivale a aproximadamente 0.2692 US\$/kWh al incluir energía, comercialización, distribución e IVA. Este consumo, de 2,455.65 kWh al mes, es significativamente superior al promedio de los hogares salvadoreños. Según el Consejo Nacional de Energía (CNE), el 40.58 % de las viviendas en el país consume menos de 99 kWh mensuales, lo que implica que un solo equipo ASIC puede llegar a consumir la misma energía que 25 viviendas en un mes, resaltando así la elevada demanda energética asociada a la minería de Bitcoin (CNE, 2019).

Si la operación incluye más de tres equipos ASIC, ya no aplicaría la categoría de pequeñas demandas. En ese caso, sería necesario migrar a un contrato para grandes demandas (mayores a 50 kW), bajo una tarifa de baja tensión con medidor horario, según lo establecido en el pliego tarifario, como se muestra en la Tabla 3-4. Esta transición implicaría un nuevo cálculo de costos energéticos, ya que el precio por kWh varía según el horario de consumo y la demanda contratada.

III. GRANDES DEMANDAS (>50 kW)									
BAJA TENSION CON MEDIDOR HORARIO									
		CAESS	DEL SUR	CLESA	EEO	DEUSEM	EDESAL	B&D	DEC
Cargo de Comercialización:									
Atención al Cliente	US\$/Usuario-mes	13.019956	15.226602	11.803785	13.853490	12.322985	16.751151	17.214672	7.928556
Cargo de Energía:									
Energía en Punta	US\$/kWh	0.210306	0.202784	0.209986	0.206328	0.220701	0.183749	0.197723	0.146874
Energía en Resto	US\$/kWh	0.177030	0.167681	0.178033	0.179710	0.189762	0.155101	0.159544	0.133031
Energía en Valle	US\$/kWh	0.208128	0.199401	0.206997	0.204023	0.218816	0.179540	0.195017	0.145024
Cargo de Distribución:									
Potencia:	US\$/kW-mes	16.116777	24.566953	24.738299	29.488459	31.683909	38.277813	17.458443	21.144428
MEDIA TENSION CON MEDIDOR HORARIO									
		CAESS	DEL SUR	CLESA	EEO	DEUSEM	EDESAL	B&D	DEC
Cargo de Comercialización:									
Cargo Fijo	US\$/Usuario-mes	13.019956	15.226602	11.803785	13.853490	12.322985	16.751151	17.214672	7.928556
Cargo de Energía:									
Energía en Punta	US\$/kWh	0.194827	0.185629	0.191509	0.183983	0.195619	0.171692	0.187937	0.129803
Energía en Resto	US\$/kWh	0.164001	0.153495	0.162367	0.160247	0.168196	0.144925	0.151648	0.117569
Energía en Valle	US\$/kWh	0.192810	0.182531	0.188783	0.181927	0.193948	0.167760	0.185365	0.128169
Cargo de Distribución:									
Potencia:	US\$/kW-mes	8.044023	9.156741	14.151259	19.220377	20.870146	9.942488	10.688800	5.447846

Tabla 3-4. Pliego tarifario vigente de mayo a julio de 2025 para grandes demandas

A continuación, en la Tabla 3-5, se presenta el cálculo estimado del costo energético para operar un equipo ASIC con una potencia contratada de 3.5 kW bajo la categoría tarifaria de grandes demandas, considerando las tarifas de electricidad diferenciadas por franjas horarias (punta, resto y valle), así como los cargos de comercialización, distribución e IVA. Este análisis resulta fundamental para comprender el impacto real de los costos eléctricos en la rentabilidad de la minería.

Potencia Contratada: 3.5 kW		
Intervalo	Cargo de Energía (US\$/kWh)	Subtotal (US\$)
Punta (18:00 a 22:59, 5 horas)	0.210306	107.59
Resto (05:00 a 17:59, 13 horas)	0.177030	235.48
Valle (23:00 a 04:59, 6 horas)	0.208128	127.77
Cargo de comercialización (13.019956 US\$/Usuario-mes)		13.02
Cargo de distribución (16.116777 US\$/kW-mes)		56.41
Total (sin IVA)		540.27
IVA (13%)		70.23
Total con IVA		610.50

Tabla 3-5. Cálculo de costos energéticos para grandes demandas

Al aplicar el esquema tarifario correspondiente a grandes demandas e incorporando los cargos por comercialización, distribución e IVA, el precio de la energía se reduce ligeramente a 0.2486 US\$/kWh, en comparación con la tarifa de pequeñas demandas. No obstante, aunque el costo unitario por kWh disminuye, el resultado financiero continúa siendo desfavorable cuando se calculan los flujos netos mensuales considerando la estructura tarifaria completa.

Pequeña demanda: Flujo neto mensual = US\$ 156.85 – US\$ 661.06 = –504.21 US\$/mes

Grandes demandas: Flujo neto mensual = US\$ 156.85 – US\$ 610.50 = –453.65 US\$/mes

3.4.3. Costos operativos adicionales a la energía

Además del consumo eléctrico, existen otros costos asociados con la operación de un Antminer S19 Pro que deben considerarse para obtener una estimación precisa de los costos operativos totales. Entre los más relevantes se encuentran:

- **Mantenimiento y reemplazo de piezas:** Los equipos ASIC, como el Antminer S19 Pro, poseen componentes susceptibles al desgaste o fallos con el tiempo, tales como ventiladores y fuentes de alimentación. Aunque su vida útil puede extenderse por varios años, es fundamental considerar el mantenimiento preventivo y el reemplazo periódico de piezas para asegurar un funcionamiento eficiente y continuo.
- **Infraestructura:** Las operaciones mineras requieren instalaciones adecuadas que incluyan sistemas de refrigeración industrial, ventilación, conexiones eléctricas estables y acceso a Internet de alta disponibilidad. Estos costos suelen formar parte de la inversión inicial, aunque también pueden representar gastos operativos recurrentes, especialmente en ambientes con altas temperaturas o mala ventilación natural.
- **Alquiler de espacio:** En caso de que la operación no se realice en una instalación propia, deben incluirse los costos de arrendamiento del inmueble. Este valor puede variar considerablemente según la ubicación, el tipo de propiedad y la infraestructura existente, representando una parte relevante del costo operativo mensual en zonas con alta demanda de espacios industriales.

Estos costos se suman al gasto energético, que, como se mencionó anteriormente, puede variar entre US\$ 610.50 y US\$ 661.06 mensuales, dependiendo de la tarifa contratada (grandes o pequeñas

demandas). Al incorporar estos costos adicionales, el mantenimiento operativo de un equipo ASIC puede resultar considerablemente elevado.

A medida que la tecnología avanza, una alternativa viable para reducir los costos operativos, especialmente los energéticos, es la adopción de fuentes de energía renovable, como la solar. Esta opción podría eliminar parcialmente la dependencia de la red eléctrica convencional, mejorar la sostenibilidad del proyecto y reducir significativamente los gastos a largo plazo. Además, contribuye a alinear la minería de criptomonedas con las tendencias globales hacia una transición energética más limpia y responsable.

3.4.4. Comparación de eficiencia energética entre Antminer S19 Pro y Antminer S21 Pro

Dado que el flujo neto al operar un Antminer S19 Pro en El Salvador resulta negativo, principalmente debido al alto precio de la electricidad, es pertinente comparar este modelo con una versión más reciente y eficiente: el Antminer S21 Pro, lanzado en 2024. Esta comparación permite evaluar los avances tecnológicos en eficiencia energética, potencia de cómputo y su impacto en la rentabilidad operativa. En la Tabla 3-6 se presentan las especificaciones técnicas de ambos equipos (Bitmain, 2024).

Parámetro	Antminer S19 Pro	Antminer S21 Pro
Año de lanzamiento	2020	2024
Precio estimado (marzo 2025)	US\$ 950 (usado)	US\$ 4,500 (nuevo)
Tasa de hash (TH/s)	110 TH/s	234 TH/s
Consumo eléctrico	3,250 W	3,510 W
Consumo diario estimado	81.86 kWh/día	84.24 kWh/día
Eficiencia energética	29.5 J/TH	15.0 J/TH
Vida útil estimada	3-4 años	4-5 años

Tabla 3-6. Especificaciones técnicas de los equipos ASIC Antminer

Como se puede observar, el Antminer S21 Pro presenta mejoras significativas en eficiencia energética y potencia de cómputo, lo que lo convierte en una opción más competitiva en comparación con el Antminer S19 Pro. Aunque su costo inicial es elevado, su rendimiento superior podría justificar la inversión, especialmente si se dispone de tarifas eléctricas reducidas.

Según estimaciones obtenidas mediante una calculadora en línea, mostradas en la Figura 3-14, el Antminer S21 Pro genera aproximadamente 0.00010965 BTC por día, lo que equivale a US\$ 9.32, tomando como referencia un precio de US\$ 85,000 por BTC. Con base en esta producción, se estima un ingreso mensual aproximado de US\$ 279.61. Cabe señalar que estos valores pueden variar dependiendo de la herramienta en línea utilizada y del momento en que se realice la estimación (NiceHash, s.f.).



Figura 3-14. Rentabilidad estimada para los Antminer S19 Pro y S21 Pro

Para analizar la rentabilidad de un equipo ASIC más moderno, la Tabla 3-7 presenta una estimación de los flujos netos mensuales para los modelos Antminer S19 Pro y Antminer S21 Pro. En el caso del S19 Pro, los cálculos se basan en datos medidos durante su operación, mientras que para el S21 Pro se utilizaron las especificaciones proporcionadas por el fabricante, complementadas con ingresos estimados mediante una calculadora en línea. En ambos casos, se ha tomado como precio de referencia el valor de US\$ 85,000 para el Bitcoin.

Además, se evaluaron dos escenarios tarifarios: uno correspondiente al pliego tarifario para pequeñas demandas y otro basado en una tarifa reducida hipotética de 0.09 US\$/kWh, que representa el costo estimado de generación de energía geotérmica en El Salvador. Los cálculos se realizaron siguiendo el procedimiento descrito en la Tabla 3-3, que considera los cargos de energía, comercialización, distribución e IVA.

Equipo	Consumo diario (kWh)	Tarifa eléctrica (US\$/kWh)	Ingreso bruto mensual (US\$)	Costo eléctrico mensual (US\$)	Flujo neto mensual (US\$)
S19 Pro	81.855	0.192553	156.85	661.06	-504.21
S19 Pro	81.855	0.090000	156.85	381.05	-224.20
S21 Pro	84.240	0.192553	279.61	680.37	-400.76
S21 Pro	84.240	0.090000	279.61	392.22	-112.61

Tabla 3-7. Estimación de la rentabilidad mensual de los equipos ASIC (85,000 US\$/BTC)

Los resultados anteriores indican que, incluso con un equipo más eficiente como el Antminer S21 Pro, la minería de Bitcoin a pequeña escala en El Salvador sigue siendo poco rentable si se depende exclusivamente de las tarifas eléctricas actuales. Aunque el uso de una tarifa reducida mejora ligeramente la situación, los flujos netos continúan siendo negativos en ambos casos.

Para ampliar el análisis, se plantea un segundo caso con un precio de mercado del Bitcoin estimado en US\$ 150,000. Este valor, deliberadamente elevado, permitirá visualizar la rentabilidad de la minería de Bitcoin bajo condiciones muy optimistas, manteniendo las dos tarifas eléctricas consideradas previamente. La Tabla 3-8 presenta los resultados de este segundo caso, utilizando los mismos datos de consumo energético diario.

Equipo	Consumo diario (kWh)	Tarifa eléctrica (US\$/kWh)	Ingreso bruto mensual (US\$)	Costo eléctrico mensual (US\$)	Flujo neto mensual (US\$)
S19 Pro	81.855	0.192553	276.80	661.06	-384.27
S19 Pro	81.855	0.090000	276.80	381.05	-104.26
S21 Pro	84.240	0.192553	493.43	680.37	-186.95
S21 Pro	84.240	0.090000	493.43	392.22	101.21

Tabla 3-8. Estimación de la rentabilidad mensual de los equipos ASIC (150,000 US\$/BTC)

En este segundo caso, el aumento del precio del Bitcoin mejora considerablemente los ingresos mensuales por minería. Esto permite que el Antminer S21 Pro, alcance una ganancia neta positiva cuando se utiliza la tarifa reducida de 0.09 US\$/kWh. Sin embargo, con la tarifa convencional del pliego tarifario, los resultados continúan siendo negativos, evidenciando la alta sensibilidad de la rentabilidad minera frente al precio de la electricidad.

Dado que los costos energéticos afectan significativamente la rentabilidad de la minería de Bitcoin, y ante la falta de información clara sobre subsidios o incentivos para el sector privado, una alternativa viable es reducir la dependencia de la red eléctrica del país. Esto implicaría diseñar sistemas fotovoltaicos que suministren la energía necesaria para los equipos ASIC. Aunque requiere una inversión inicial alta, podría ser una solución sostenible a largo plazo y permitiría revertir las pérdidas.

3.5. Desafíos de la minería de criptomonedas en El Salvador

El estudio realizado revela que, en El Salvador, la demanda eléctrica ya no proviene exclusivamente de hogares, comercios e industrias, sino que también incluye equipos de alto consumo energético, como los utilizados para la minería de Bitcoin. Esta situación representa un desafío importante, dado que la matriz energética nacional carece de excedentes suficientes y depende de recursos limitados, lo que dificulta mantener esta actividad sin incrementar la carga sobre el sistema eléctrico.

Además, el análisis realizado con equipos como el Antminer S19 Pro muestra que, bajo las condiciones actuales de tarifas e infraestructura, la minería de criptomonedas no es rentable ni sostenible. La viabilidad de estas operaciones dependerá en gran medida del acceso a energía renovable a bajo costo y de un marco regulatorio que promueva un uso responsable de los recursos energéticos. En este sentido, el reto principal consiste en determinar si la minería puede ser una oportunidad para el desarrollo económico del país, o si, por el contrario, representa un riesgo para la seguridad y estabilidad energética.

3.5.1. Limitaciones de la matriz energética salvadoreña

El principal obstáculo para la sostenibilidad de la minería en El Salvador radica en la limitada capacidad de su matriz energética. El sistema eléctrico depende principalmente de fuentes hidroeléctricas, geotérmicas y termoeléctricas, pero carece de excedentes suficientes para satisfacer la alta demanda generada por los equipos ASIC utilizados en la minería de criptomonedas.

En 2022, el sistema eléctrico salvadoreño operó sin excedentes de generación, lo que significó que no pudo cubrir la demanda interna sin recurrir a la importación de energía. Este hecho resalta las dificultades del sistema para absorber incrementos en la carga eléctrica. Según muestra la Figura 3-15, cerca del 21.7 % de la energía generada provino de derivados del petróleo, y el país tuvo que importar aproximadamente 706 GWh, lo que representó un déficit energético del 10 %. Esta dependencia de

fuentes fósiles y de importaciones refleja una matriz energética frágil, insuficiente para sostener actividades de alto consumo, como la minería de Bitcoin (InvestinElSalvador, 2023).

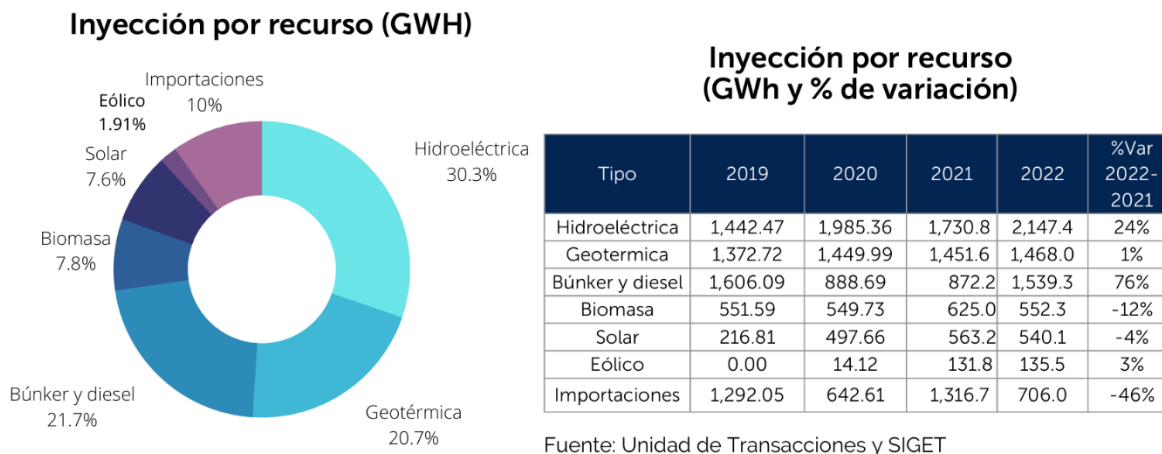


Figura 3-15. Inyección energética por recurso en El Salvador, 2022 (InvestinElSalvador, 2023)

La figura también muestra que, entre 2019 y 2022, la generación hidroeléctrica lideró la matriz energética con alrededor del 30.3 % en 2022. La energía solar creció hasta alcanzar el 7.6 %, y la energía eólica, que comenzó en 2020 con menos del 1 %, alcanzó casi el 2 % en 2022, impulsada por la operación del primer parque eólico del país, lo que evidencia un avance hacia la diversificación de la matriz energética.

Además, como indica la figura, la energía geotérmica, considerada una de las fuentes más idóneas en El Salvador para la minería de Bitcoin, representó aproximadamente el 20 % de la energía inyectada a la red en 2022, una proporción relativamente baja en comparación con otras fuentes. Aunque este porcentaje es significativo, no es suficiente para sostener una expansión masiva de la minería. Si se destinara parte de esta energía a la minería, se reduciría la disponibilidad para otros sectores o sería necesario recurrir a la generación térmica con combustibles fósiles, lo que incrementaría la contaminación.

Una cuestión frecuentemente ignorada es la competencia energética que genera la minería de Bitcoin al conectarse a la red eléctrica nacional. En términos operativos, cada kilovatio-hora consumido por un equipo ASIC reduce la disponibilidad de energía para el consumo residencial, los servicios públicos o actividades productivas, como la agricultura y la manufactura.

Un ejemplo de esto ocurrió durante la tormenta invernal Uri de 2021 en Austin, Texas, cuando las plantas de minería de Bitcoin continuaron operando mientras millones de hogares se quedaban sin electricidad. Esta crisis energética causó varias muertes por frío, ya que la minería consumía electricidad equivalente a la de 6,500 hogares. A pesar de la emergencia, empresas como BitDeer siguieron funcionando, según un contrato que les garantizaba pagos por cortes de energía. A medianoche, el operador de la red ordenó apagar los equipos mineros, y BitDeer obtuvo más de 18 millones de dólares en cuatro días sin minar (Dance, 2023).

El Salvador no cuenta con dos condiciones esenciales para que la minería de Bitcoin sea rentable: energía eléctrica a bajo costo y un clima frío. Ambos son factores cruciales para una operación eficiente y sostenible. Un ejemplo claro de los altos costos de la electricidad es el proyecto estatal en Berlín, Usulután, donde, según *El Diario de Hoy*, durante los primeros días de prueba se gastaron aproximadamente US\$ 4,672.00 en electricidad para generar solo US\$ 269.00 en Bitcoin. Esto representa una ganancia de apenas 6 centavos por cada dólar invertido en energía, lo que evidencia la baja viabilidad de estas operaciones cuando dependen de tarifas eléctricas comerciales (Alvarado, 2025).

Aunque este estudio se limita a evaluar la prefactibilidad técnica y económica de alimentar uno o varios equipos ASIC con energía solar fotovoltaica autónoma, los desafíos son considerables. La alta inversión inicial, la necesidad de almacenamiento energético y la variabilidad en la generación solar dificultan su implementación. Además, si se incluyen otras cargas como refrigeración, iluminación o infraestructura auxiliar, los costos eléctricos aumentan, lo que reduce la rentabilidad, incluso cuando se utiliza exclusivamente energía renovable.

3.5.2. Modelos estatales de minería y su sostenibilidad limitada

El Estado salvadoreño ha implementado modelos de minería con un enfoque energético diferenciado. La planta geotérmica de Berlín destinó aproximadamente 1.5 MW de su capacidad a la minería de Bitcoin, utilizando energía a costo de generación y sin sobrecargos por transmisión ni distribución. Esta estrategia permitió minar cerca de 474 BTC entre 2021 y 2024, demostrando la viabilidad de proyectos estatales con recursos renovables específicos (Latimedia, 2024).

Proyectos de mayor escala, como *Volcano Energy*, combinan inversión privada internacional con participación estatal cercana a US\$ 1,000 millones. La iniciativa contempla instalar 241 MW de capacidad renovable mediante fuentes solar y eólica, asegurando la sostenibilidad de la minería sin

afectar la demanda local, siempre que se utilicen recursos energéticos específicos y se cuente con acuerdos regulatorios claros (Volcano Energy, 2023).

Sin embargo, la minería a pequeña y mediana escala enfrenta barreras significativas. Los altos costos iniciales, la dificultad de acceder de manera continua y suficiente a energía renovable y la necesidad de negociar condiciones específicas dificultan su operación. Para quienes consideran la minería como inversión a largo plazo, la acumulación de bitcoins puede ser una estrategia viable, aunque la rentabilidad inmediata continúe siendo limitada.

3.6. Implicaciones energéticas y necesidad de una alternativa de suministro

Los resultados obtenidos con el Antminer S19 Pro muestran que, bajo operación continua, su demanda eléctrica alcanza aproximadamente 3.5 kW, con un consumo cercano a 81.86 kWh diarios por unidad. Al operar múltiples equipos, la carga y los costos aumentan proporcionalmente, consolidando al precio del kilovatio-hora como la variable más crítica del análisis financiero, especialmente bajo las tarifas vigentes en El Salvador.

En conclusión, la rentabilidad de la minería a pequeña escala depende del acceso a energía renovable o de la disposición a asumirla como inversión a largo plazo. Los costos operativos actuales limitan la rentabilidad inmediata, evidenciando la necesidad de explorar alternativas que reduzcan la dependencia de la red eléctrica y estabilicen los costos energéticos.

En el capítulo siguiente se abordará el dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico para abastecer los equipos ASIC, evaluando inversión inicial, costos de operación y principales indicadores financieros, con el objetivo de determinar su viabilidad técnica y económica como suministro sostenible.

CAPÍTULO 4. DISEÑO DE PLANTA FOTOVOLTAICA PARA OPERACIÓN DE MINERÍA DE BITCOIN

En el capítulo anterior se determinó que el consumo energético de los equipos ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*) utilizados en la minería de Bitcoin es considerablemente elevado. Esta característica constituye un desafío relevante para este tipo de operaciones, particularmente en países donde las tarifas de energía eléctrica son altas. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo realizar un estudio de prefactibilidad del uso de energía solar fotovoltaica como fuente de suministro eléctrico para sistemas de minería de Bitcoin, con el propósito de reducir los costos operativos asociados al consumo de energía proveniente de la red eléctrica local.

Las fuentes de energía renovable, y en especial la energía solar fotovoltaica, se presentan como una alternativa viable para garantizar un suministro energético sostenible, confiable y económicamente competitivo. En el caso de El Salvador, las condiciones geográficas y climáticas favorecen el aprovechamiento del recurso solar en gran parte de su territorio, lo que genera un entorno propicio para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos a distintas escalas.

4.1. Antecedentes de la minería de Bitcoin en El Salvador con energías renovables

En los últimos años, El Salvador se ha posicionado como un referente a nivel internacional en la adopción del Bitcoin como moneda de curso legal y en la promoción de iniciativas de minería de criptomonedas basadas en el uso de fuentes de energía renovable. Esta estrategia busca aprovechar los recursos energéticos del país, fomentar la innovación tecnológica y reducir los costos asociados al consumo de energía eléctrica proveniente de la red nacional.

Un ejemplo representativo de este enfoque es la colaboración entre *Volcano Energy* y *Luxor Technology Corporation*, que dio origen al primer *pool de minería* de Bitcoin en el país, denominado *Lava Pool*. El proyecto tiene como objetivo abastecer las operaciones de minería mediante energía renovable, combinando energía geotérmica, aprovechando el potencial volcánico del país, y energía solar disponible en el territorio salvadoreño. La Figura 4-1 muestra una representación conceptual del proyecto y su relación con las fuentes de energía renovable utilizadas.



Figura 4-1. Representación conceptual de Volcano Energy (Rivera, 2023)

En junio de 2023, Max Keiser, presidente de *Volcano Energy*, presentó un proyecto de gran escala orientado a convertir a El Salvador en un centro regional de minería de Bitcoin. La iniciativa contempla la construcción de un parque de generación de energías renovables con una potencia total instalada de 241 MW, ubicado en el caserío El Shiste, municipio de Metapán, departamento de Santa Ana (Rivera, 2023).

La propuesta considera 169 MW de energía solar fotovoltaica y 72 MW de energía eólica, con una inversión inicial estimada en US\$ 250 millones. La puesta en operación de la planta solar estaba prevista en un plazo de seis a nueve meses, mientras que la incorporación de generación geotérmica se proyecta a mediano plazo, con el objetivo de cubrir la mayor parte de la demanda energética mediante recursos renovables y sostenibles.

En este contexto, la empresa Tether, emisora de la *stablecoin US\$T*, participa como inversionista estratégico, aportando capital y experiencia técnica especializada en infraestructura digital y tecnologías financieras. La inversión total estimada asciende a aproximadamente US\$ 1,000 millones, destinados al desarrollo de infraestructura de generación renovable, que permitiría alcanzar una potencia de cómputo superior a 1.3 EH/s (1.3 exahashes por segundo o 1.3×10^{18} H/s), posicionando el proyecto entre los más grandes del mundo en minería de Bitcoin (Volcano Energy, 2023).

Se proyecta que, a partir de esta inversión, los ingresos generados por la minería de Bitcoin contribuyan significativamente a la reducción de la deuda externa del país para el año 2030, destinando parte de

las ganancias tanto a la expansión de la infraestructura energética nacional como a aportes directos al Estado salvadoreño.

La experiencia obtenida a partir de proyectos como *Volcano Energy* permite formular la hipótesis de que la integración de la minería de Bitcoin con sistemas de generación solar fotovoltaica puede ser técnica y económicamente viable. No obstante, la rentabilidad de este tipo de plantas depende en gran medida del nivel de inversión inicial y de la escala del proyecto. En la práctica, estas iniciativas suelen desarrollarse en entornos industriales de gran tamaño, donde se logra una mejora en la rentabilidad del proyecto gracias a la reducción del costo unitario de producción y al mejor aprovechamiento de los recursos, efectos asociados a las economías de escala.

Cabe señalar que la mayor parte de la información disponible sobre *Volcano Energy* ha sido difundida por medios afines al Gobierno, los cuales no han precisado con claridad si el proyecto se encuentra actualmente en operación. Según declaraciones de su director ejecutivo, la planta fotovoltaica estaba proyectada para generar aproximadamente 85 MW hacia finales de 2024, con el objetivo de iniciar operaciones de minería de Bitcoin a comienzos del año siguiente. Posteriormente, la planta eólica sumaría 49.6 MW hacia finales de 2025, alcanzando una potencia total superior a 130 MW en la primera fase del proyecto. Hasta la fecha, no se dispone de información pública que confirme la entrada en operación efectiva de estas instalaciones (Rivera, 2024).

Paralelamente al desarrollo de *Volcano Energy*, el municipio de Metapán se ha consolidado como un epicentro de proyectos industriales que integran energías renovables en sus procesos productivos, reforzando el potencial de la región para la implementación de sistemas de generación solar. Un ejemplo relevante es la planta El Ronco de Holcim El Salvador, donde se incorporó energía solar fotovoltaica en la producción de cemento como parte de una estrategia orientada a la sostenibilidad y la reducción de la huella de carbono.

El proyecto contemplaba, hacia finales de 2021, la construcción de un parque fotovoltaico compuesto por aproximadamente 39,200 módulos fotovoltaicos, instalados en un área de 14.3 hectáreas, con una potencia instalada de 17 MWp. Esta capacidad permitiría cubrir cerca del 21 % del consumo energético total del proceso productivo, y se preveía que el sistema entrara en operación en 2023, posibilitando la producción de cemento mediante el uso de energía solar (Holcim El Salvador, 2022).

Si bien los proyectos descritos corresponden a instalaciones de gran escala, su mención establece un marco de referencia sobre el uso de la energía solar fotovoltaica en aplicaciones industriales y tecnológicas en El Salvador. Este contexto resulta fundamental para evaluar alternativas de generación

solar adaptadas a distintos niveles de demanda, desde grandes instalaciones hasta soluciones más limitadas, orientadas a aplicaciones específicas como la minería de Bitcoin a pequeña escala.

4.2. Potencial solar en El Salvador

La ubicación geográfica de El Salvador constituye un factor clave para el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica. Al encontrarse dentro de la franja tropical y relativamente cerca del ecuador terrestre, el país recibe una radiación solar elevada y relativamente constante a lo largo del año. Además, presenta un régimen climático definido por dos estaciones, la seca y la lluviosa, lo que favorece una generación fotovoltaica predecible. Estas condiciones son especialmente relevantes para aplicaciones que requieren alto consumo energético continuo, como la minería de Bitcoin.

Según datos del Global Solar Atlas del Banco Mundial, la irradiación global horizontal (*GHI, Global Horizontal Irradiance*) en El Salvador varía entre 5.0 y 6.2 kWh/m²-día en la mayor parte del territorio, como se muestra en la Figura 4-2. Para fines de diseño preliminar de sistemas fotovoltaicos, es común considerar un valor promedio entre 5.3 y 5.5 kWh/m²-día, representativo de las condiciones solares del país (SolarGIS, s.f.-a).

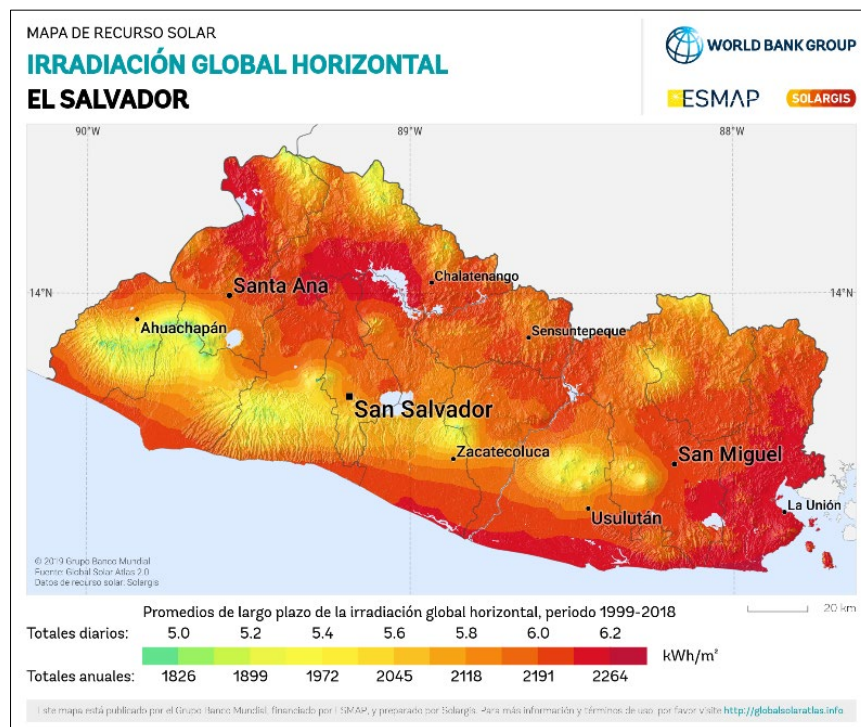


Figura 4-2. Promedio de 20 años de irradiación global horizontal en El Salvador (SolarGIS, s.f.-a)

El Salvador presenta niveles de radiación solar significativamente superiores a los de países como Alemania y Japón, los cuales, a pesar de contar con una alta potencia instalada de energía fotovoltaica, registran valores promedio de GHI inferiores a 3.5 kWh/m²-día. Esto convierte al país en un territorio con elevado potencial para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos técnica y económicamente viables, siempre que se realice un dimensionamiento adecuado según la carga y las horas de demanda energética (Soluciones LED, 2024).

4.2.1. Evolución de la potencia instalada de energía solar fotovoltaica en El Salvador

La energía solar fotovoltaica comenzó a adquirir relevancia en la matriz energética de El Salvador a partir de 2015, cuando la potencia instalada alcanzó 11.58 MW. Antes de ese año, su participación era limitada, concentrándose principalmente en proyectos de pequeña escala.

En 2016, la potencia instalada aumentó a 13.23 MW, marcando el inicio de una etapa de crecimiento sostenido. El incremento más acelerado se registró en los años posteriores, alcanzando 181.81 MW en 2018, consolidando a la energía solar como una fuente renovable relevante dentro de la matriz energética nacional.

Para 2022, la potencia instalada de energía solar fotovoltaica alcanzó 521.47 MW, lo que representó aproximadamente el 20 % del total nacional. La Figura 4-3 muestra la evolución histórica de esta participación en comparación con otras fuentes de generación (DGEHM, 2024).

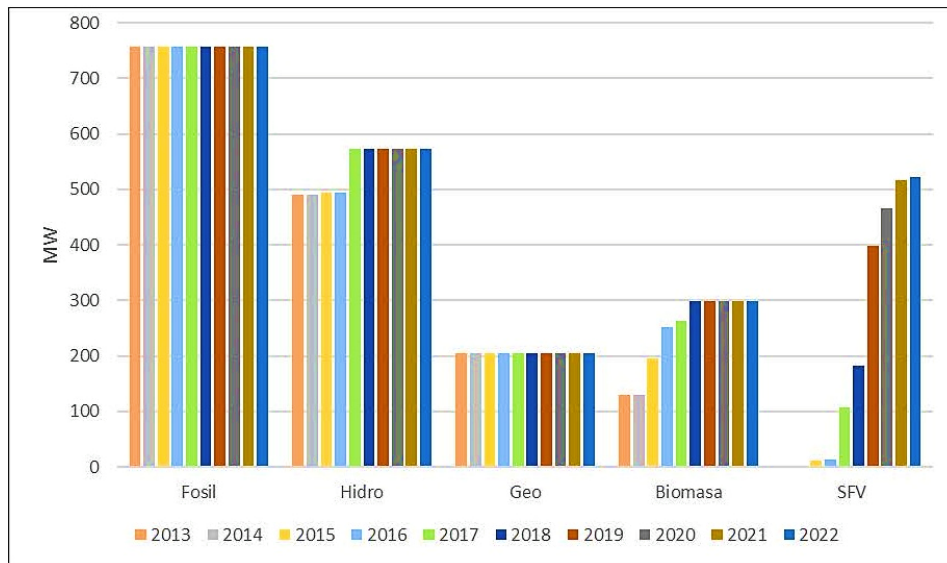


Figura 4-3. Evolución de la potencia instalada en El Salvador (elaboración propia con datos de DGEHM, 2024)

Actualmente, la energía solar fotovoltaica complementa a fuentes renovables como la hidroeléctrica y la geotérmica, contribuyendo a diversificar y fortalecer la matriz energética nacional. Esta evolución respalda la factibilidad técnica de proyectos con altos requerimientos energéticos, basados en el aprovechamiento de fuentes renovables.

4.2.2. Horas sol pico e irradiancia

Para el análisis y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, es fundamental comprender algunos parámetros esenciales, entre ellos la relación entre la irradiancia solar y las horas sol pico. Estos valores permiten estimar de manera confiable la energía eléctrica que puede generar una instalación bajo condiciones climáticas específicas.

La irradiancia solar se define como la potencia de la radiación solar incidente sobre una superficie y se expresa en W/m^2 . Este valor varía a lo largo del día según la posición del sol, las condiciones atmosféricas y la ubicación geográfica. En las Condiciones Estándar de Prueba (*STC, Standard Test Conditions*) utilizadas por los fabricantes de módulos fotovoltaicos, se considera una irradiancia de $1,000 W/m^2$, un espectro solar AM 1.5 (*Air Mass 1.5*) y una temperatura de célula de $25\text{ }^\circ\text{C}$ (SunFields Europe, 2025a).

A partir del perfil diario de irradiancia se define el concepto de horas sol pico (HSP), que representa el número de horas equivalentes durante las cuales la irradiancia solar sería constante e igual a un valor de $1,000 W/m^2$, manteniendo la misma energía diaria total. Este concepto permite expresar la irradiancia diaria de forma simplificada y práctica para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos.

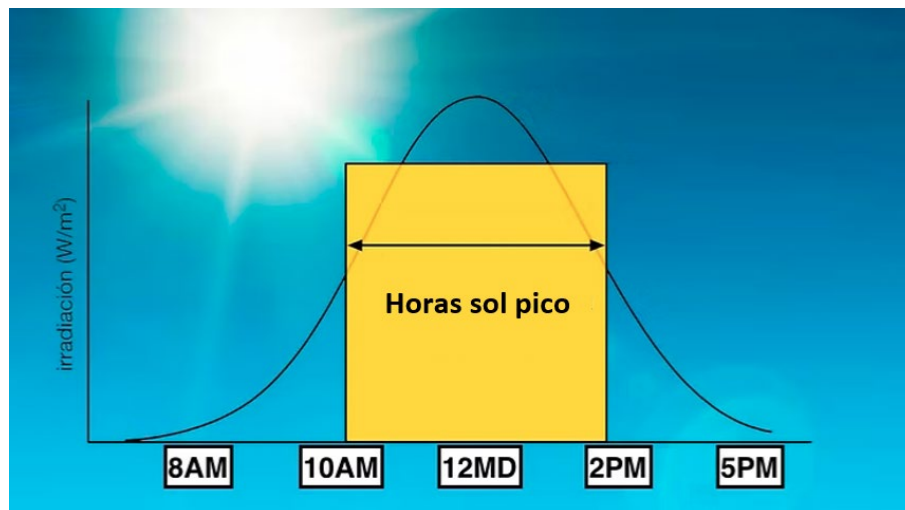


Figura 4-4. Distribución de la irradiancia solar diaria y su equivalencia en horas sol pico

En El Salvador, el promedio de horas sol pico es de aproximadamente 5.5 horas diarias, lo que indica que la energía solar disponible equivale a ese período de irradiancia máxima sobre la superficie del módulo fotovoltaico. La Figura 4-4 ilustra la distribución de la irradiancia solar a lo largo del día, mostrando cómo la radiación varía desde las primeras horas de la mañana hasta el atardecer. Este parámetro es fundamental para la estimación preliminar de la producción energética de un sistema fotovoltaico.

De forma complementaria, la *carta solar* constituye una herramienta gráfica para el análisis del recurso solar en una ubicación geográfica específica. Representa la trayectoria aparente del sol a lo largo del año y permite identificar los ángulos de altura y azimut solar según la hora del día y la época del año. Su uso facilita el análisis de sombras, la evaluación de obstáculos cercanos y la determinación de la orientación e inclinación óptimas de los módulos fotovoltaicos, con el fin de maximizar la captación de radiación solar y minimizar las pérdidas por sombreado.

En el hemisferio norte, como es el caso de El Salvador (entre las latitudes 13.1° N y 14.5° N), los módulos fotovoltaicos se orientan generalmente hacia el sur geográfico para maximizar la captación solar anual. Para sistemas de inclinación fija, una práctica común consiste en ajustar el ángulo de inclinación del módulo cercano a la latitud del sitio, lo que permite un aprovechamiento eficiente del recurso solar. La Figura 4-5 muestra una carta solar obtenida del Global Solar Atlas para la zona de Santa Ana, complementada con la hoja de datos solares del lugar (SolarGIS, s.f.-a).

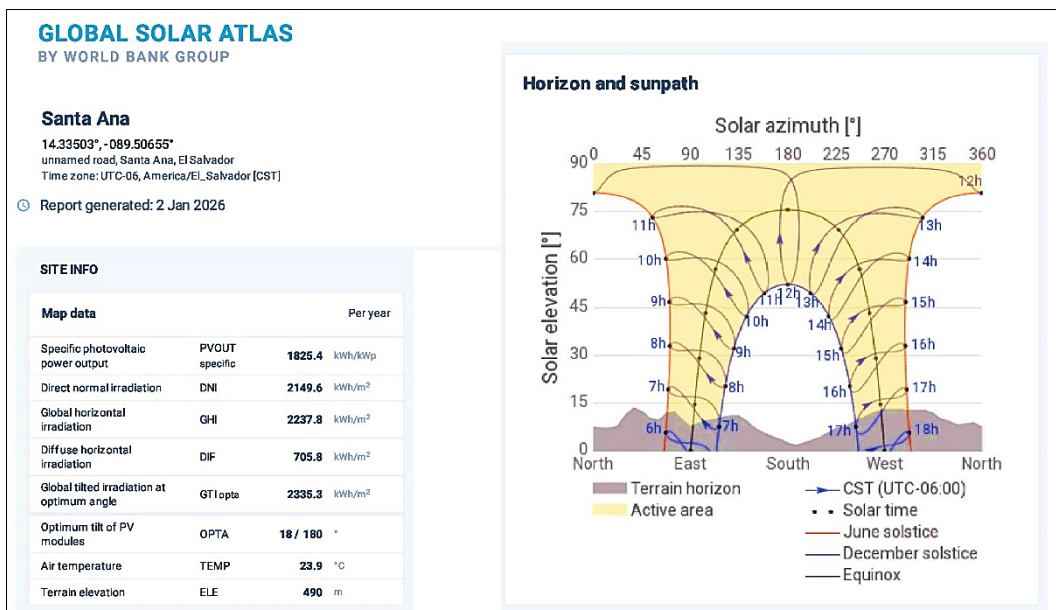


Figura 4-5. Carta solar de Santa Ana, en la zona de *Volcano Energy* y la planta *El Ronco de Holcim*

4.2.3. Potencia pico y energía generada

La potencia pico, expresada en watt pico (Wp) o kilowatt pico (kWp), corresponde a la potencia eléctrica máxima que un módulo o sistema fotovoltaico puede entregar bajo Condiciones Estándar de Prueba (STC). Este parámetro constituye una referencia normalizada para el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos; sin embargo, no representa la potencia real de operación bajo condiciones ambientales variables.

Por su parte, la energía eléctrica generada (Wh o kWh), depende de la potencia pico instalada, la disponibilidad del recurso solar y las pérdidas globales del sistema. Estas pérdidas incluyen los efectos de la temperatura en los módulos fotovoltaicos, la eficiencia del inversor, el cableado, la acumulación de suciedad, la degradación de los componentes y otros factores que afectan el rendimiento de la instalación.

De forma simplificada, la relación entre la potencia pico instalada y la energía eléctrica generada puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$E_{diaria} = P_{instalada} \times HSP$$

donde E_{diaria} es la energía producida diariamente (kWh), $P_{instalada}$ es la potencia pico del sistema (kWp) y HSP corresponde al número de horas sol pico diarias. Para estimar la energía realmente entregada por el sistema, este valor debe ajustarse mediante un factor global de pérdidas.

En condiciones típicas de El Salvador, se ha medido que un sistema fotovoltaico de 1 kWp puede generar entre 1,500 y 1,800 kWh anuales, dependiendo de la ubicación geográfica, la orientación e inclinación de los módulos y del desempeño global del sistema. Este valor se conoce como rendimiento final o *Final Yield* (Y_f) y se expresa en kWh/kWp·año, lo que permite comparar el desempeño energético de distintos sistemas fotovoltaicos independientemente de su potencia instalada (Sidn, 2025).

4.2.4. Factor de capacidad de sistemas fotovoltaicos

El factor de capacidad (FC) es un indicador que permite evaluar el desempeño real de un sistema fotovoltaico de generación eléctrica, al relacionar la energía efectivamente producida durante un año determinado con la energía máxima teórica que podría generarse si el sistema operara de forma continua a su potencia nominal durante todas las horas del año. Este parámetro resulta útil para comparar el aprovechamiento energético de distintas tecnologías de generación, independientemente de la potencia instalada.

El factor de capacidad se expresa matemáticamente de la siguiente manera para un período anual:

$$FC = \frac{\text{Energía real generada en el año}}{\text{Energía máxima posible}} = \frac{E_{\text{anual}}}{P_{\text{instalada}} \times 8,760}$$

donde E_{anual} corresponde a la energía eléctrica generada durante el período de análisis (kWh), $P_{\text{instalada}}$ representa la potencia nominal del sistema (kWp), y 8,760 corresponde al número total de horas de un año, resultado del producto de 24 horas por 365 días (SotySolar, 2023).

En regiones con condiciones de irradiación solar excepcionalmente altas, como zonas desérticas del norte de África o del suroeste de Estados Unidos, los sistemas fotovoltaicos pueden alcanzar factores de capacidad cercanos al 26 %–30 %, especialmente cuando se emplean tecnologías de seguimiento solar. Estos valores se deben a una mayor disponibilidad de horas sol pico, que puede oscilar entre 6 y 7 horas diarias, así como a una baja nubosidad y reducida humedad atmosférica, factores que favorecen un mayor aprovechamiento de la radiación solar incidente (EIA, 2019).

En el caso de El Salvador, las condiciones solares permiten alcanzar factores de capacidad competitivos en comparación con otros países de Latinoamérica, cercanos al 20 % en sistemas fotovoltaicos correctamente diseñados y operados. Este valor respalda la viabilidad técnica de los sistemas fotovoltaicos para aplicaciones de alto consumo energético continuo, como la minería de Bitcoin (IRENA, 2024).

4.2.5. Indicadores de la energía solar fotovoltaica en América Latina

Según datos de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), entre los años 2011 y 2019 se registró una reducción significativa en los costos de instalación de sistemas de energía solar fotovoltaica a gran escala en América Latina y el Caribe. Esta disminución se atribuye principalmente a avances tecnológicos, economías de escala y mejoras en la eficiencia de fabricación de módulos y componentes. Durante este período, el costo total medio ponderado de instalación de proyectos solares se redujo desde valores superiores a 6,000 US\$/kWp hasta cifras cercanas a 1,300 US\$/kWp en la región, reflejando una caída sustancial en los costos de generación fotovoltaica.

De forma paralela, el factor de capacidad (FC) de los sistemas fotovoltaicos mostró una tendencia creciente, alcanzando aproximadamente el 21 % en 2019. Este incremento no se debe a un aumento en la irradiancia solar disponible, sino a mejoras tecnológicas en los módulos, una mayor eficiencia de conversión, la reducción de pérdidas del sistema y la optimización de las condiciones de operación y

mantenimiento. Como resultado, se obtiene una mayor producción energética anual por unidad de potencia instalada.

Otro indicador clave es el Costo Nivelado de Electricidad (*LCOE, Levelized Cost of Electricity*), el cual representa el costo promedio de generación de electricidad a lo largo de la vida útil de una planta fotovoltaica. En el período analizado, el LCOE se redujo desde valores superiores a 0.40 US\$/kWh en 2011 hasta niveles cercanos a 0.07 US\$/kWh en 2019, lo que consolidó a la energía solar fotovoltaica como una alternativa altamente competitiva frente a las fuentes de generación convencionales.

La reducción simultánea del CAPEX y del LCOE, junto con la mejora del FC y la optimización de los costos operativos (*OPEX, Operational Expenditure*), ha fortalecido la competitividad de la energía solar fotovoltaica en la región y ha facilitado su adopción en distintos sectores económicos. Estos indicadores, presentados en la Figura 4-6, reflejan un entorno cada vez más favorable para la implementación de sistemas fotovoltaicos, considerando que se trata de valores promedio sujetos a variaciones entre países (IRENA, 2022).

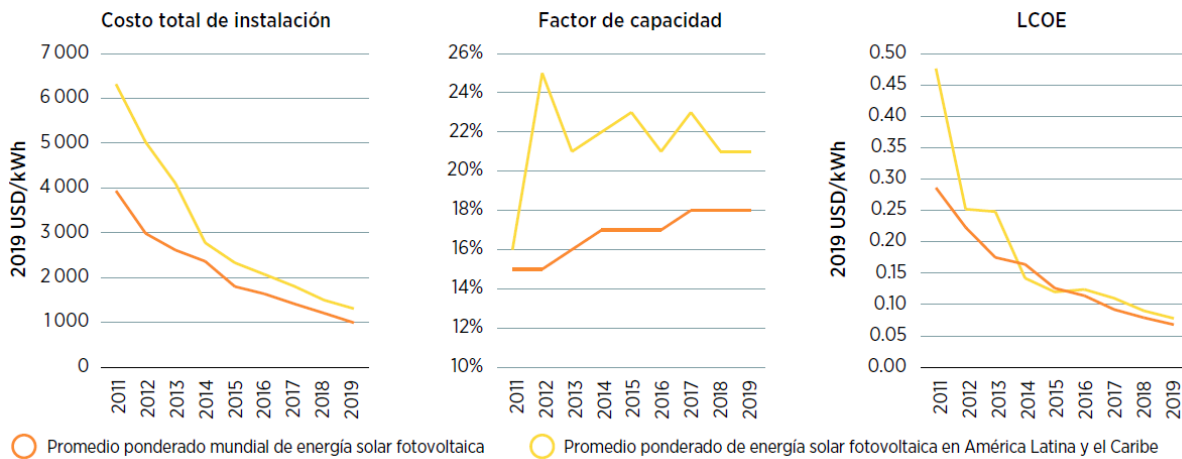


Figura 4-6. Costo total de instalación, Factor de Capacidad y Costo Nivelado de Electricidad fotovoltaica en América Latina y el Caribe (2010–2019)

4.3. Elementos de un sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico convierte la radiación solar en energía eléctrica utilizable mediante la integración de diversos componentes, entre los que destacan los módulos fotovoltaicos, el inversor y, en determinados casos, el regulador de carga y los sistemas de almacenamiento con baterías. La correcta selección y el adecuado dimensionamiento de estos elementos son fundamentales para

garantizar la eficiencia, confiabilidad y viabilidad técnica del sistema, especialmente en aplicaciones de alta demanda energética.

4.3.1. Tipos de sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos se clasifican principalmente según su relación con la red eléctrica y la presencia o ausencia de almacenamiento energético. Esta clasificación define su diseño, operación y aplicaciones específicas. De manera general, se distinguen tres tipos: sistemas conectados a la red, sistemas aislados y sistemas híbridos (Wega Energy, 2023).

Sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica (*on-grid*)

Este sistema se integra directamente a la infraestructura eléctrica local y no requiere baterías. Utiliza inversores sincronizados con la red para abastecer las cargas locales con la energía generada o inyectar el excedente a la red eléctrica. Su principal objetivo es reducir el consumo de energía proveniente de la red y los costos asociados. Se caracteriza por su simplicidad de diseño, menor inversión inicial y alta eficiencia económica.

Sistema fotovoltaico aislado de la red eléctrica (*off-grid*)

El sistema aislado opera de manera independiente de la red y es adecuado para zonas rurales o áreas de difícil acceso. Incorpora baterías para almacenar la energía y garantizar un suministro continuo, incluso durante períodos de baja radiación solar. Su configuración modular permite adaptar la potencia de generación y almacenamiento según la demanda energética.

Sistema fotovoltaico híbrido

El sistema híbrido combina las características de los sistemas conectados a la red y de los sistemas aislados. Mantiene la conexión a la red eléctrica e incorpora almacenamiento energético, lo que permite una gestión más flexible de la energía generada. Esta configuración mejora la seguridad del suministro, optimiza el autoconsumo y permite un uso más eficiente de la energía disponible, especialmente en condiciones con variaciones en la generación o en la demanda.

4.3.2. Módulos fotovoltaicos (paneles solares)

Los módulos fotovoltaicos son los dispositivos encargados de transformar la radiación solar en corriente continua (DC) mediante el efecto fotovoltaico. La potencia generada por un módulo depende principalmente de la irradiancia solar incidente, la temperatura de operación y sus características eléctricas. Además, la cantidad de módulos instalados y su interconexión determinan los niveles de tensión y corriente del sistema. En la Figura 4-7 se muestra un ejemplo de planta de generación fotovoltaica instalada en El Salvador.



Figura 4-7. Planta de generación solar fotovoltaica en El Salvador (Molina, 2024)

Tipos de módulos fotovoltaicos

- **Módulos monocristalinos:** Están fabricados a partir de un único cristal de silicio. Presentan las mayores eficiencias comerciales, generalmente entre 17 % y 20 %, pudiendo alcanzar hasta un 24 % en condiciones de laboratorio. Se caracterizan por su larga vida útil y buen desempeño en condiciones de baja irradiancia, lo que los hace ideales cuando el espacio de instalación es limitado, aunque su costo es superior al de otros tipos de módulos.
- **Módulos policristalinos:** Están compuestos por múltiples cristales de silicio. Su eficiencia comercial varía entre el 13 % y el 15 %, con valores máximos cercanos al 19 % en laboratorio. Su menor costo de producción y su buen comportamiento térmico los hacen adecuados para climas cálidos, siendo una opción económica cuando se dispone de suficiente espacio para su instalación.

- **Módulos de capa fina o película delgada:** Utilizan semiconductores delgados como silicio amorfo, CIGS o CdTe. Presentan eficiencias comerciales más bajas, entre 7 % y 9 %, aunque pueden alcanzar hasta un 13 % en laboratorio. Destacan por su bajo costo, buen desempeño a altas temperaturas y facilidad de integración arquitectónica. Sin embargo, no suelen recomendarse para sistemas de alta demanda energética debido a su menor densidad de potencia.

Los módulos pueden conectarse en serie o en paralelo, en función de los requerimientos de tensión y corriente del sistema. La curva I-V permite analizar su comportamiento bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura. La vida útil típica de los módulos fotovoltaicos alcanza los 25 años, manteniendo al menos el 80 % de su capacidad inicial. Además, la orientación e inclinación de los módulos influyen directamente en el rendimiento global del sistema. En la Figura 4-8 se presentan los principales tipos de módulos fotovoltaicos (Tritec Center, 2017).

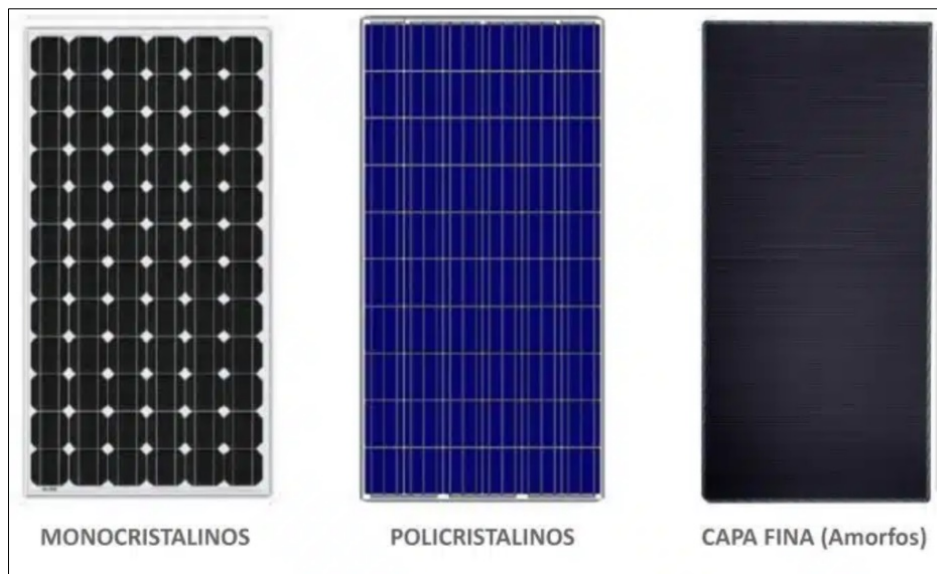


Figura 4-8. Tipos de módulos fotovoltaicos (Tritec Center, 2017)

4.3.3. Regulador de carga

El regulador de carga es el dispositivo encargado de gestionar el flujo de energía entre los módulos fotovoltaicos, el sistema de almacenamiento y el inversor, asegurando niveles de tensión adecuados y protegiendo la instalación frente a sobrecargas, descargas profundas y corrientes inversas. Su selección depende de la configuración eléctrica y de las características del sistema fotovoltaico. En la Figura 4-9 se muestra un esquema de un sistema fotovoltaico aislado (*off-grid*), en el que la carga es alimentada

por los módulos fotovoltaicos y el sistema de almacenamiento, a través del regulador de carga (Anastasia, 2025).

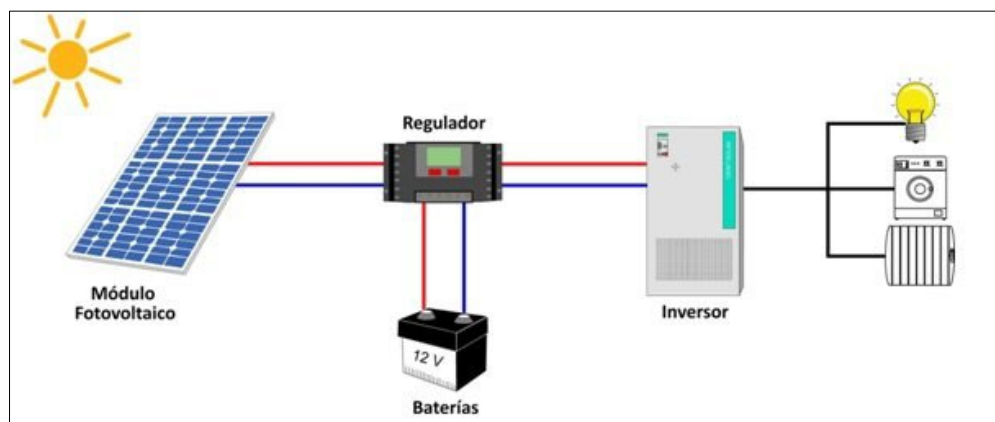


Figura 4-9. Diagrama de un sistema fotovoltaico aislado (*off-grid*) con regulador de carga

Tipos principales de reguladores de carga:

- **Reguladores PWM (Pulse Width Modulation):** Funcionan regulando el proceso de carga mediante conmutación electrónica, ajustando la salida de los módulos fotovoltaicos a la tensión del banco de baterías. Este tipo de reguladores proporciona un control básico y confiable de la carga, siendo comúnmente utilizado en sistemas fotovoltaicos de pequeña escala.
- **Reguladores MPPT (Maximum Power Point Tracking):** Optimizan la transferencia de energía al rastrear continuamente el punto de máxima potencia de los módulos fotovoltaicos. Este tipo de regulador permite incrementar la eficiencia del sistema hasta en un 30 % en comparación con los reguladores PWM, especialmente en sistemas de mayor potencia.

4.3.4. Almacenamiento de energía

Las baterías permiten almacenar la energía generada por los módulos fotovoltaicos para su uso durante períodos de baja o nula radiación solar. Aunque no son indispensables en sistemas conectados a la red, resultan esenciales en configuraciones híbridas o aisladas que requieren autonomía energética. En estas aplicaciones se emplean baterías de ciclo profundo, capaces de soportar descargas frecuentes, definidas por una profundidad de descarga (*DoD, Depth of Discharge*) de hasta el 70 %-90 % de su capacidad nominal. Su adecuada selección y dimensionamiento influyen directamente en la eficiencia, la confiabilidad y la vida útil del sistema (Enlight, 2021).

Entre las tecnologías más utilizadas destacan las baterías de plomo-ácido selladas con válvula reguladora (VRLA, *Valve-Regulated Lead-Acid*), ampliamente utilizadas por su robustez y costo competitivo. Dentro de esta categoría se incluyen las variantes AGM y GEL, diseñadas para operación en ciclo profundo. Estas baterías incorporan sistemas de recombinación interna de gases que minimizan la pérdida de electrolito y reducen el mantenimiento requerido; además, presentan buen desempeño ante descargas profundas y adecuada estabilidad térmica, asegurando una vida útil consistente bajo condiciones controladas (AutoSolar, s.f.).

Por su parte, las baterías de iones de litio, especialmente las de química LiFePO_4 (*Lithium Iron Phosphate*), ofrecen mayor densidad energética, alta eficiencia de carga y descarga y larga vida en términos de ciclos de carga y descarga, lo que permite reducir el volumen del sistema y optimizar la eficiencia global. También presentan baja auto descarga y mínimos requerimientos de mantenimiento, aunque su inversión inicial suele ser superior a la de las tecnologías de plomo-ácido. En la Figura 4-10 se muestra una fotografía de este tipo de batería (Ubuy El Salvador, s.f.).



Figura 4-10. Baterías de iones de litio para almacenamiento de energía fotovoltaica

4.3.5. Inversores

Los inversores solares son componentes esenciales de un sistema fotovoltaico, ya que convierten la corriente continua (DC) generada por los módulos en corriente alterna (AC), utilizada por la mayoría de los equipos eléctricos. Además de esta función principal, los inversores modernos incorporan sistemas de protección, control y optimización, garantizando un funcionamiento seguro, estable y eficiente a lo largo de la vida útil del sistema (SunFields Europe, 2025b).

La eficiencia del inversor influye directamente en el rendimiento global del sistema, ya que las pérdidas en esta etapa reducen la energía disponible para el consumo. Los inversores de alta calidad pueden alcanzar eficiencias superiores al 98 % en condiciones óptimas de operación e incluyen funciones de monitoreo remoto y comunicación, lo que permite supervisar continuamente el sistema, detectar fallas de manera temprana y optimizar el desempeño energético.

La selección del inversor solar depende de criterios técnicos, como la potencia del sistema, el tipo de conexión, la eficiencia, las condiciones del sitio, las protecciones requeridas y la necesidad de redundancia, así como de criterios económicos relacionados con los costos de inversión, operación y mantenimiento.

Existen tres tipos principales de inversores solares según su modo de operación dentro del sistema:

- **Inversores para sistemas aislados (*off-grid*):** convierten la energía en corriente continua almacenada en baterías, proveniente de los módulos fotovoltaicos, en corriente alterna para alimentar cargas locales sin conexión a la red eléctrica.
- **Inversores híbridos:** combinan las funciones de inversor y cargador, permitiendo la gestión de energía proveniente tanto de los módulos fotovoltaicos como de fuentes externas en corriente alterna, como la red eléctrica o generadores, facilitando la carga de baterías y el suministro a las cargas.
- **Inversores de conexión a red (*on-grid*):** operan sincronizados con la red eléctrica y convierten la energía generada por los módulos fotovoltaicos en corriente alterna para su consumo directo o la inyección de excedentes a la red, como se muestra en la Figura 4-11.

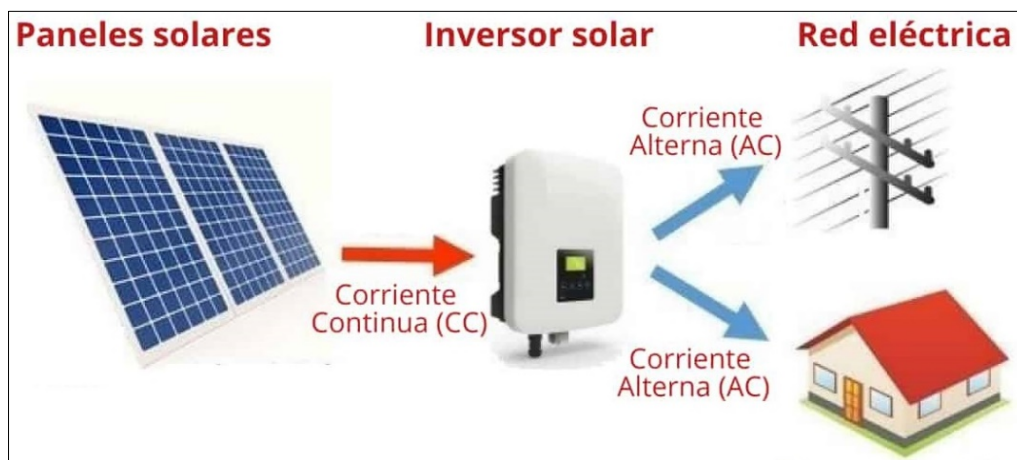


Figura 4-11. Inversor solar en un sistema conectado a la red (*on-grid*)

4.4. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

El dimensionamiento del sistema fotovoltaico tiene como objetivo determinar la capacidad de generación requerida para abastecer la demanda energética de una operación de minería de Bitcoin compuesta por diez equipos ASIC, considerando un régimen de operación continuo de 24 horas al día. Para este análisis se toman en cuenta la ubicación geográfica del sitio de estudio, el consumo energético total del sistema, la disponibilidad del recurso solar y las características técnicas de los principales componentes del sistema fotovoltaico.

El diseño se plantea bajo dos escenarios de operación: un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica (*on-grid*) y un sistema fotovoltaico híbrido que incorpora almacenamiento energético mediante un banco de baterías. En ambos casos, el generador fotovoltaico se dimensiona con el objetivo de cubrir la demanda energética anual estimada del sistema de minería. En el sistema *on-grid*, la continuidad del suministro eléctrico se garantiza mediante la conexión a la red. Por su parte, en el sistema híbrido, esta continuidad se complementa con el uso de almacenamiento energético, lo que permite reducir la dependencia de la red durante períodos nocturnos o de baja radiación solar.

4.4.1. Ubicación geográfica del sitio de estudio

El análisis bibliográfico y la revisión de proyectos de generación de energía renovable desarrollados en El Salvador indican que el municipio de Metapán, en el departamento de Santa Ana, constituye una ubicación estratégica para la implementación de sistemas fotovoltaicos. Esta zona presenta un elevado recurso solar, condiciones climáticas favorables, disponibilidad de superficie y una infraestructura energética en desarrollo, factores que favorecen la viabilidad técnica de proyectos de generación renovable.

La zona norte del departamento de Santa Ana se ha consolidado como un polo de desarrollo para proyectos de energía renovable a mediana y gran escala, lo que respalda la selección de Metapán como sitio de referencia para el diseño del sistema fotovoltaico. El área de estudio se ubica dentro del triángulo conformado por el proyecto Volcano Energy, la planta solar El Ronco de la cementera Holcim y el Parque Eólico Ventus. Se considera una superficie aproximada de 5,000 m² (0.5 hectáreas), la cual resulta suficiente para la instalación de los módulos fotovoltaicos, inversores, banco de baterías, equipos auxiliares y equipos ASIC destinados a la operación de minería de Bitcoin. Cabe señalar que la ubicación propuesta es únicamente referencial y se utiliza para fines de modelado, sin implicar la selección de un terreno específico ni la evaluación de su costo.

Para el desarrollo del diseño se selecciona como punto de referencia un área ubicada entre el cerro El Matadero (635 m s. n. m.) y el cerro Orlona (747 m s. n. m.), cercana a la Hacienda Santa Fe, en el municipio de Metapán, departamento de Santa Ana. La Figura 4-12 muestra un mapa con la ubicación exacta del sitio de diseño. Las coordenadas geográficas del terreno son:

- Latitud: 14.33503° N
- Longitud: 89.50655° O
- Altitud: 600 m s. n. m.

La ubicación del generador fotovoltaico influye directamente en el desempeño del sistema, ya que condiciona la disponibilidad del recurso solar, la temperatura ambiente promedio y las condiciones climáticas predominantes. Estos factores afectan tanto el dimensionamiento del sistema como la estimación del potencial de producción energética y la eficiencia de los equipos durante su operación (Solargis, s.f.-b).

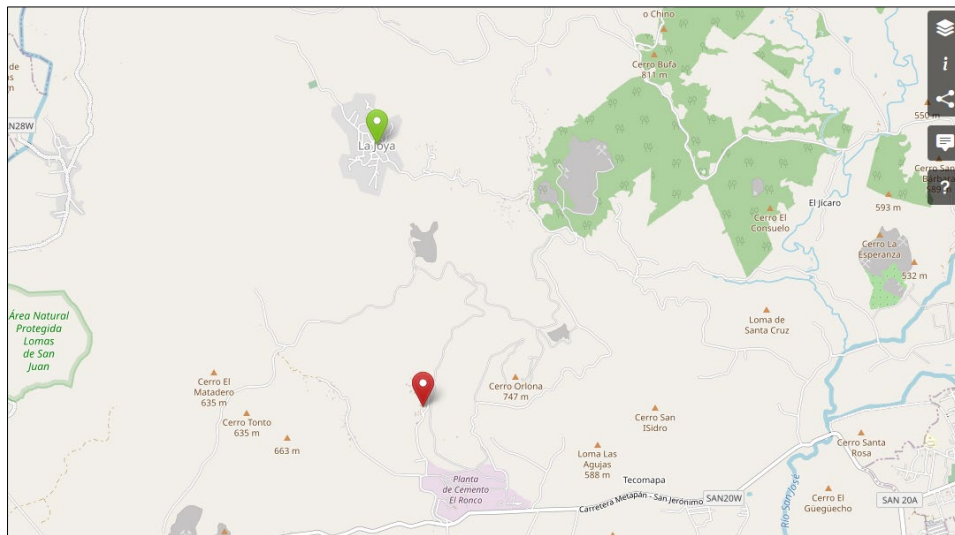


Figura 4-12. Mapa de ubicación del sitio de diseño en Metapán, Santa Ana, El Salvador (OpenStreetMap, s.f.)

El primer paso para el dimensionamiento consiste en determinar la demanda energética real de la operación de minería, ya que este valor define directamente la potencia requerida del generador fotovoltaico y del sistema de almacenamiento.

4.4.2. Determinación del consumo energético

El consumo energético del sistema está determinado principalmente por la energía eléctrica requerida por los equipos ASIC utilizados para la minería de Bitcoin, así como por las cargas auxiliares necesarias

para garantizar su operación continua. Estas cargas incluyen sistemas de ventilación forzada para la disipación de calor, climatización activa para el control de la temperatura, además de iluminación y equipos de monitoreo y control.

En este estudio de caso se considera una operación compuesta por diez equipos ASIC, cada uno con una potencia nominal de 3.5 kW. Este valor se obtuvo a partir de pruebas realizadas en un equipo Antminer S19 Pro, operando de manera continua durante 24 horas. En consecuencia, la potencia total demandada por los equipos de minería es de 35 kW, equivalente a un consumo energético diario de:

$$E_{ASIC} = 35 \text{ kW} \times 24 \text{ h} = 840 \text{ kWh/día}$$

Adicionalmente, se estima el consumo energético asociado a la climatización del área de operación. Se considera un espacio aproximado de 2 m × 3 m (6 m²) destinado a la instalación de los equipos, climatizado mediante dos unidades de aire acondicionado de 24,000 BTU/h cada una, equivalentes a dos toneladas de refrigeración por unidad. La capacidad combinada de 48,000 BTU/h corresponde aproximadamente a 14.1 kW de potencia térmica de enfriamiento.

El consumo eléctrico real de los sistemas de climatización depende de su eficiencia energética, la cual se expresa comúnmente mediante el índice SEER (*Seasonal Energy Efficiency Ratio*). La mayoría de los equipos disponibles en el mercado suelen ser de eficiencia moderada, por lo que el consumo eléctrico típico de una unidad de 24,000 BTU/h se sitúa entre 2.4 y 3.0 kW. Al considerar la operación simultánea de ambas unidades, la demanda eléctrica estimada se encuentra en un rango de 4.8 a 6.0 kW.

Para fines de diseño, se adopta un valor conservador de 8 kW para la climatización continua, incorporando un margen de seguridad energética que considera la eventual incorporación de cargas térmicas adicionales, la operación de sistemas de ventilación forzada y la variabilidad asociada a condiciones ambientales desfavorables (National Air Warehouse, s. f.).

Por su parte, la iluminación y las cargas auxiliares presentan un consumo relativamente bajo; no obstante, se considera una potencia adicional de 2 kW con el fin de incluir equipos de apoyo y disponer de un margen de seguridad en el diseño del sistema. En conjunto, la potencia total instalada será la siguiente:

$$P_{total} = 35 \text{ kW} + 8 \text{ kW} + 2 \text{ kW} = 45 \text{ kW}$$

Bajo un régimen de operación continua de 24 horas, el consumo energético diario total asciende a 1,080 kWh/día, lo que equivale a un consumo energético anual aproximado de 394,200 kWh/año.

Para fines de diseño y considerando márgenes de seguridad asociados a variaciones operativas y posibles expansiones futuras, este valor se redondea a 400,000 kWh/año. La Tabla 4-1 presenta el desglose del consumo energético diario y anual, detallando la demanda de cada tipo de carga.

Elemento	Potencia (kW)	Horas/día	Energía diaria (kWh/día)	Energía anual (kWh/año)
Equipos ASIC (10)	35	24	840	306,600
Aires acondicionados	8	24	192	70,080
Iluminación y auxiliares	2	24	48	17,520
Total	45		1,080	394,200

Tabla 4-1. Consumo energético diario y anual del sistema

4.4.3. Dimensionamiento del generador fotovoltaico

El dimensionamiento del generador fotovoltaico se basa en la energía eléctrica anual requerida para abastecer la operación de minería de Bitcoin. La carga total del sistema es de 45 kW, lo que corresponde a un consumo energético anual aproximado de 400,000 kWh, valor adoptado para fines de diseño.

Para determinar la potencia instalada del generador fotovoltaico se utiliza el rendimiento final del sistema (Y_f), el cual relaciona la energía eléctrica anual entregada en corriente alterna (AC) con la potencia pico instalada en corriente continua (DC) de los módulos fotovoltaicos. Este parámetro incorpora las pérdidas globales del sistema, incluyendo pérdidas en los inversores, el cableado, los efectos de la temperatura sobre los módulos, la suciedad superficial y otros factores operativos.

Para la zona de Metapán se adopta un valor conservador del rendimiento final anual de:

$$Y_f = 1,600 \text{ kWh/kWp} \cdot \text{año}$$

La potencia requerida del generador fotovoltaico se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_{FV} = \frac{E_{anual}}{Y_f} = \frac{400,000 \text{ kWh}}{1,600 \text{ kWh/kWp}} \approx 250 \text{ kWp}$$

Por lo tanto, se requiere un generador fotovoltaico con una potencia instalada aproximada de 250 kWp para cubrir la demanda energética anual del sistema bajo las condiciones consideradas.

4.4.4. Selección de módulos fotovoltaicos

Número de módulos

Para el diseño del sistema se seleccionan módulos fotovoltaicos de alta eficiencia de 600 Wp, ampliamente utilizados en instalaciones de mediana y gran escala por su equilibrio técnico-económico entre eficiencia, disponibilidad comercial y costo unitario por potencia pico instalada (US\$/kWp). Aunque existen módulos con potencias nominales de hasta 615 Wp, se adopta un valor de 600 Wp con el fin de mantener un criterio conservador en el dimensionamiento y garantizar la robustez del diseño ante posibles variaciones en las especificaciones comerciales (Wuxi SHANXU SOLAR, s.f.).

El número total de módulos requeridos se determina a partir de la relación entre la potencia pico total del generador fotovoltaico y la potencia nominal de cada módulo, según la siguiente expresión:

$$N_{\text{módulos}} = \frac{250,000 \text{ W}}{600 \text{ W}} \approx 416.7 \text{ módulos}$$

Para fines de diseño, configuración eléctrica y planificación del sistema, este valor se redondea a 420 módulos fotovoltaicos, lo que facilita la conformación de *strings* equilibrados y proporciona un pequeño margen adicional de potencia instalada.

Área requerida para la instalación de los módulos

Cada módulo fotovoltaico de 600 Wp ocupa un área aproximada de 3 m². Por lo tanto, el área total directamente cubierta por los 420 módulos se estima como:

$$A_{\text{módulos}} = 420 \times 3 \approx 1,260 \text{ m}^2$$

Sin embargo, el área efectiva necesaria para la instalación del sistema fotovoltaico es mayor, ya que debe considerar factores del diseño de plantas solares, como la separación entre filas para evitar sombreados, los pasillos de mantenimiento, las estructuras de soporte, la inclinación de los módulos y el acceso a los equipos eléctricos; por ello, se adopta un factor de ocupación de 1.6 en la estimación del área.

Con este factor, el área total requerida para la instalación del generador fotovoltaico se estima en aproximadamente 2,016 m², valor que resulta significativamente inferior a la superficie disponible de 5,000 m². Esto confirma la viabilidad espacial del diseño y permite contemplar futuras expansiones del sistema sin afectar la instalación existente.

4.4.5. Dimensionamiento de inversores

Los inversores gestionan el flujo de energía entre el generador fotovoltaico, las cargas y la red eléctrica. Para este proyecto se seleccionan inversores híbridos de 12 kW de potencia nominal, capaces de operar tanto en sistemas conectados a la red (*on-grid*) como en configuraciones híbridas con almacenamiento energético. Estos equipos operan con un banco de baterías de 48 V y salida en fase dividida, lo que permite obtener tensiones de 120 V o 240 V sin necesidad de transformador externo (Ineldec, s.f.).

La potencia total instalada del generador fotovoltaico es de 250 kWp en corriente continua (DC). Para el dimensionamiento de la potencia nominal en corriente alterna (AC) se adopta una relación DC/AC de 1.25, criterio comúnmente utilizado en sistemas fotovoltaicos para optimizar el aprovechamiento del recurso solar y mejorar el rendimiento global del sistema. Por lo tanto, la potencia nominal requerida en AC se determina mediante:

$$P_{AC} = \frac{250 \text{ kWp}}{1.25} = 200 \text{ kW}$$

El número de inversores se calcula dividiendo la potencia nominal total en AC entre la potencia nominal de cada equipo:

$$N_{\text{inversores}} = \frac{200 \text{ kW}}{12 \text{ kW}} = 16.6 \approx 17 \text{ inversores}$$

Para fines de diseño, este valor se redondea al entero superior, considerando la instalación de 17 inversores híbridos de 12 kW. Esta configuración permite cubrir adecuadamente la potencia requerida, operar dentro de los rangos eléctricos recomendados por los fabricantes y mantener un diseño modular que facilita la operación y el mantenimiento del sistema.

En el escenario híbrido, además del generador fotovoltaico y los inversores, es necesario dimensionar el sistema de almacenamiento energético que garantice la continuidad del suministro durante períodos sin generación fotovoltaica.

4.4.6. Dimensionamiento de *strings* y banco de baterías

Dimensionamiento de *strings* fotovoltaicos

El dimensionamiento de los *strings* se realiza considerando la tensión nominal de los módulos fotovoltaicos y el rango de operación del seguidor MPPT del inversor (160 V – 800 V). Con base en estos

criterios, cada *string* se configura con 10 módulos en serie, alcanzando una tensión de operación aproximada de 400 V_{DC}, valor adecuado para el rango de operación del inversor.

Con un total de 420 módulos fotovoltaicos, el número de *strings* requeridos se determina mediante la siguiente expresión:

$$N_{strings} = 420/10 = 42 \text{ strings}$$

La potencia nominal de cada *string* resulta de la suma de la potencia individual de los módulos que lo conforman, obteniéndose:

$$P_{string} = 10 \times 600 \text{ W} = 6 \text{ kW}$$

Los 42 *strings* se distribuyen entre los 17 inversores, asignando dos o tres *strings* por equipo según la configuración de sus seguidores MPPT, lo que garantiza una operación equilibrada y dentro de los rangos eléctricos recomendados.

Dimensionamiento del banco de baterías

Para el escenario híbrido del sistema se considera una autonomía energética de 12 horas, con el objetivo de cubrir los períodos nocturnos y eventuales intervalos de baja generación fotovoltaica. La energía requerida durante este período se calcula a partir de la potencia promedio demandada por el sistema, estimada en 45 kW, según la siguiente expresión:

$$E_{autonomía} = 45 \text{ kW} \times 12 \text{ h} = 540 \text{ kWh}$$

Para el dimensionamiento del banco se utilizarán baterías de iones de litio tipo LiFePO₄, las cuales presentan una profundidad de descarga (DoD) del 90 %. Además, se adoptará una eficiencia global del sistema del 85 %, valores representativos de este tipo de sistemas de almacenamiento energético. Bajo estas condiciones, la capacidad nominal requerida se calcula como:

$$Capacidad \text{ nominal} = \frac{540}{0.85 \times 0.90} = 705.88 \text{ kWh}$$

Las baterías de litio seleccionadas son de 16 kWh y cuentan con una tensión nominal de 48/51.2 V y una capacidad de 314 Ah, integrando un sistema de gestión de baterías (*BMS, Battery Management System*) de 200 A con interfaces de comunicación CAN 2.0 y RS485. Estas características las hacen

adecuadas para aplicaciones de almacenamiento en sistemas fotovoltaicos híbridos. Por lo tanto, el número total de baterías necesarias es:

$$N_{baterías} = \frac{705.88 \text{ kWh}}{16.0 \text{ kWh}} = 44.12 \approx 45 \text{ unidades}$$

Para asegurar la compatibilidad con el sistema en corriente continua de 48 V del inversor, cada módulo se encuentra configurado internamente a este nivel de tensión. Por lo tanto, la conexión del banco de baterías se realiza principalmente en paralelo, con el objetivo de incrementar la capacidad energética total del sistema. Esta configuración facilita la gestión de corriente, permite la escalabilidad y asegura el correcto funcionamiento del sistema de gestión de baterías (BMS) en condiciones de operación continua. La Tabla 4-2 resume los principales resultados del dimensionamiento del sistema fotovoltaico, incluyendo los componentes del generador solar y del banco de baterías (Sol Verde El Salvador, s.f.).

Descripción	Valor
Potencia total del SFV	250 kWp
Número total de módulos	420
Módulos por <i>string</i>	10
Número de <i>strings</i>	42
Número de inversores	17
Banco de baterías de litio	45 unidades

Tabla 4-2. Resultados del dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Con base en estos resultados, en el siguiente apartado se estimará la inversión inicial a partir de cotizaciones locales de módulos fotovoltaicos, inversores, banco de baterías y equipos auxiliares. Adicionalmente, se evaluarán los costos de operación y mantenimiento, con el fin de incorporarlos al análisis económico preliminar y determinar la factibilidad financiera del proyecto y el período de recuperación de la inversión durante su vida útil.

4.5. Estimación de costos del sistema solar fotovoltaico

Una vez definido el dimensionamiento técnico del sistema fotovoltaico y de sus componentes principales, como módulos fotovoltaicos, inversores y banco de baterías, corresponde evaluar la viabilidad económica del proyecto. En esta sección se estiman los costos de implementación, complementando el análisis técnico y permitiendo identificar los elementos que generan mayor impacto en el presupuesto, así como comparar las distintas configuraciones del sistema.

El análisis económico se realiza bajo un *horizonte de evaluación* de 20 años, correspondiente a la vida útil nominal de los módulos fotovoltaicos, que constituyen el principal activo del sistema. Aunque estos pueden operar hasta 25 años, se adopta un criterio conservador para proyectar los flujos de inversión, operación y reposición. Para la evaluación económica se consideran dos escenarios: un sistema conectado a la red eléctrica (*on-grid*) y un sistema híbrido con banco de baterías, estimando los costos asociados a cada opción.

Además, con la información técnica obtenida en el dimensionamiento y los costos asociados al proyecto, se puede calcular el Costo Nivelado de Electricidad (LCOE), indicador que permite relacionar los costos totales del sistema con la energía generada a lo largo de su vida útil y evaluar su competitividad frente al precio promedio de la electricidad en El Salvador.

Escenario A – Sistema fotovoltaico conectado a la red (*on-grid*)

En este escenario, el sistema fotovoltaico opera interconectado a la red eléctrica, sin incorporar almacenamiento energético. Durante las horas de mayor radiación solar, la energía generada abastece directamente las cargas de la operación de minería de Bitcoin y los servicios auxiliares. Los excedentes de energía se inyectan a la red eléctrica, mientras que durante la noche o en períodos de baja radiación, la demanda se cubre mediante el suministro proveniente de la red, garantizando la continuidad del servicio.

El sistema se dimensiona de forma que la energía generada durante el día cubra la mayor parte de la demanda, mientras que el excedente se inyecta a la red para compensar el consumo nocturno, logrando un balance energético cercano a cero. Esta estrategia optimiza el aprovechamiento de la energía renovable, reduce los costos operativos, mantiene una inversión inicial moderada y elimina la necesidad de almacenamiento energético. Además, simplifica la operación al no requerir mantenimiento de baterías, disminuyendo los riesgos técnicos y financieros del sistema.

Escenario B – Sistema fotovoltaico híbrido

En este escenario, el sistema combina la generación solar con un banco de baterías, permitiendo suministrar energía a las cargas tanto durante el día como en la noche, con una dependencia mínima de la red eléctrica, la cual se utiliza únicamente como respaldo ante períodos prolongados de baja generación solar o ante eventualidades operativas imprevistas.

El banco de baterías proporcionará aproximadamente 12 horas de autonomía, incrementando la seguridad y continuidad del suministro energético en la operación de minería de Bitcoin. No obstante, esta configuración implica un aumento significativo de la inversión inicial, así como mayores costos de operación y mantenimiento, asociados principalmente a la gestión, degradación y eventual reemplazo del sistema de almacenamiento durante la vida útil del proyecto.

4.5.1. Costos de inversión inicial (CAPEX)

Se procede a cuantificar la inversión inicial requerida para cada escenario analizado. Este análisis de costos se enfoca exclusivamente en la infraestructura del sistema fotovoltaico, incluyendo módulos solares, inversores, estructuras de soporte, cableado y protecciones eléctricas. En el caso del sistema híbrido, también se incorpora el costo del banco de baterías. No se consideran dentro de este análisis los equipos de minería ASIC ni los sistemas de ventilación e iluminación.

Los costos de los componentes se basan en cotizaciones del mercado local, incorporando los impuestos aplicables y considerando la disponibilidad de equipos en el país. Este enfoque permite estimar con mayor precisión los costos reales de adquisición e instalación, así como su compatibilidad técnica con el diseño propuesto.

Adicionalmente, existen costos indirectos asociados a la implementación, tales como mano de obra especializada, transporte, permisos y cumplimiento normativo, los cuales pueden incidir en la inversión total del proyecto. La incorporación detallada de estos costos queda fuera del alcance del presente estudio y podrá abordarse en investigaciones futuras.

Dado que el presente estudio corresponde a una etapa de prefactibilidad, los valores estimados están sujetos a variaciones asociadas a la dinámica del mercado fotovoltaico y las condiciones de importación. La Tabla 4-3 presenta el desglose de la inversión inicial estimada (CAPEX) para ambos escenarios analizados.

Concepto	Unidad	Cantidad	Costo unitario (US\$)	Total (US\$)
Módulos fotovoltaicos 600 Wp	Panel	420	125	52,500
Inversores fotovoltaicos	Unidad	17	4,500	76,500
Banco de baterías de litio	Unidad	45	5,000	225,000
Subtotal equipos principales	–	–	–	354,000
Estructura y montaje (10 %)	–	–	–	35,400
Cableado y protecciones (5 %)	–	–	–	17,600
CAPEX total sistema híbrido	–	–	–	407,000
CAPEX total sistema <i>on-grid</i>	–	–	–	182,000

Tabla 4-3. Estimación de la inversión inicial (CAPEX) del sistema fotovoltaico

4.5.2. Costos operativos anuales (OPEX)

Los costos operativos anuales (OPEX) del proyecto incluyen el mantenimiento preventivo y correctivo de los módulos fotovoltaicos y los inversores, el consumo eventual de energía proveniente de la red eléctrica en los casos requeridos, así como los gastos administrativos asociados a la operación general del sistema. Estas actividades son necesarias para garantizar la continuidad operativa, mantener la eficiencia energética y preservar la vida útil de los equipos durante el horizonte de análisis.

En el caso del sistema híbrido, se incorpora un costo anual asociado a la reposición parcial del banco de baterías, debido a que su vida útil es inferior al horizonte del proyecto. Las baterías de iones de litio tipo LiFePO₄ presentan una vida útil típica de entre 10 y 15 años, dependiendo de las condiciones de operación; por ello, se prevé una reposición parcial de su capacidad hacia el final del período de evaluación.

Generalmente, para baterías de litio, se estima la sustitución del 25 % del banco de baterías a lo largo de la vida útil del proyecto. Considerando un costo inicial de US\$ 225,000, esto equivale a un monto aproximado de US\$ 56,250, el cual se prorroga linealmente durante un horizonte de 20 años,

resultando en un costo anual cercano a US\$ 3,000. Este valor representa, de manera simplificada, el efecto de la degradación y la reposición del sistema de almacenamiento.

Los costos de operación y mantenimiento se estiman con base en referencias de proyectos fotovoltaicos de mediana escala y en prácticas comunes de la industria para sistemas interconectados y con almacenamiento energético. Este enfoque permite obtener una estimación conservadora y consistente de los costos operativos anuales para ambos escenarios evaluados. La Tabla 4-4 presenta el resumen de los costos operativos anuales estimados para el sistema fotovoltaico conectado a la red y el sistema híbrido con almacenamiento energético.

Concepto	Costo anual (US\$)
Mantenimiento de módulos e inversores	4,000
Energía de respaldo de red	4,000
Costos administrativos y seguros	4,000
Reemplazo de baterías (prorrateso, sistema híbrido)	3,000
OPEX anual sistema híbrido	15,000
OPEX anual sistema <i>on-grid</i>	12,000

Tabla 4-4. Estimación de los costos operativos anuales (OPEX) del sistema fotovoltaico

4.5.3. Costo Nivelado de Electricidad (LCOE)

Con los valores estimados de inversión inicial (CAPEX) y costos de operación y mantenimiento (OPEX), se calcula el Costo Nivelado de Electricidad (LCOE), indicador que permite evaluar la competitividad económica de los sistemas de generación eléctrica. Este relaciona los costos totales del proyecto a lo largo de su vida útil con la energía total generada durante ese período, permitiendo comparar el costo de la energía producida con el precio de la electricidad suministrada por la red. El LCOE se calcula mediante la siguiente expresión:

$$LCOE = \frac{CAPEX + (OPEX \text{ anual} \times \text{vida útil})}{\text{Energía total generada durante la vida útil}}$$

Para este análisis se considera una vida útil del sistema de 20 años y una generación anual aproximada de 400,000 kWh, de acuerdo con el dimensionamiento técnico previamente desarrollado.

- **LCOE para el sistema fotovoltaico conectado a la red (*on-grid*):**

$$LCOE = \frac{182,000 + 12,000 \times 20}{400,000 \times 20} = \frac{422,000}{8,000,000} \approx 0.053 \text{ US\$/kWh}$$

- **LCOE para el sistema fotovoltaico híbrido:**

$$LCOE = \frac{407,000 + 15,000 \times 20}{400,000 \times 20} = \frac{707,000}{8,000,000} \approx 0.088 \text{ US\$/kWh}$$

Los valores obtenidos en ambos escenarios son significativamente inferiores al precio de la electricidad en El Salvador, que para grandes demandas era aproximadamente de 0.2486 US\$/kWh, incluyendo comercialización, distribución e impuestos.

Esto indica que ambos sistemas fotovoltaicos son económicamente competitivos frente al suministro convencional, al generar energía a un costo por kWh inferior al de la red local. De las alternativas evaluadas, el sistema fotovoltaico conectado a la red (*on-grid*) presenta el menor Costo Nivelado de Electricidad (LCOE), constituyéndose como la opción más eficiente desde el punto de vista económico.

4.6. Evaluación financiera del proyecto de minería de Bitcoin

La factibilidad económica del proyecto se evalúa considerando los ingresos derivados de la operación de minería de Bitcoin y los costos asociados al sistema fotovoltaico, incluyendo la inversión inicial (CAPEX) y los costos operativos anuales (OPEX). Se adopta un horizonte de evaluación de 20 años, alineado con el análisis técnico previo, lo que permite mantener coherencia en la proyección de flujos de caja y la comparación entre escenarios.

El desempeño financiero se analiza mediante indicadores clásicos, como flujo neto anual, período de recuperación simple (*payback simple*), Valor Presente Neto (VPN) y Tasa Interna de Retorno (TIR). Estos indicadores permiten evaluar cuantitativamente la conveniencia económica de cada alternativa bajo distintos supuestos de producción de Bitcoin y costos operativos.

Los ingresos del proyecto dependen de factores externos, como la volatilidad del precio de Bitcoin, la reducción de la recompensa por bloque (*halving*), la *dificultad de la red* y los esquemas de pago de las *pools de minería*. Aunque no se incluyen directamente en el modelo financiero, considerarlos en la planificación permite evaluar de manera más realista la capacidad del proyecto de cubrir costos y generar ganancias bajo distintas condiciones de operación y mercado.

4.6.1. Indicadores del caso base – Bitcoin a US\$ 85,000

Flujo neto anual

Cada equipo Antminer S19 Pro produce en promedio 0.00006151 BTC por día. Para diez equipos, la producción anual estimada es:

$$\text{Producción anual} = 0.00006151 \times 10 \times 365 \approx 0.2245 \text{ BTC/año}$$

Con un precio de Bitcoin de US\$ 85,000, los ingresos anuales se calculan como:

$$\text{Ingresos anuales} = 0.2245 \times 85,000 \approx 19,083 \text{ US\$/año}$$

El flujo neto anual, considerando los costos operativos (OPEX), se determina para cada escenario:

- Sistema *on-grid*: $19,083 - 12,000 = 7,083 \text{ US\$/año}$
- Sistema híbrido: $19,083 - 15,000 = 4,083 \text{ US\$/año}$

Se observa que ambos escenarios generan un flujo neto anual positivo. El sistema *on-grid* presenta un mayor margen operativo debido a menores costos de operación y mantenimiento, mientras que el sistema híbrido, aunque viable, reduce su rentabilidad debido al incremento en OPEX por el prorrateo y mantenimiento del sistema de almacenamiento energético.

Período de recuperación simple (*payback simple*)

El *payback simple* estima el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a partir del flujo neto anual, sin considerar el valor del dinero en el tiempo. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Payback simple} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Flujo neto anual}}$$

- Sistema *on-grid*: $182,000 \text{ US\$} / 7,083 \text{ US\$/año} = 25.7 \text{ años}$
- Sistema híbrido: $407,000 \text{ US\$} / 4,083 \text{ US\$/año} = 99.7 \text{ años}$

En ambos casos, el *período de recuperación simple* supera el horizonte de evaluación de 20 años, lo que indica que, bajo las condiciones del caso base, el proyecto genera flujos positivos, pero no recupera la inversión inicial dentro del período considerado. La Tabla 4-5 resume los principales indicadores económicos de ambos escenarios para un precio de Bitcoin de US\$ 85,000.

Indicador	On-grid	Híbrido
CAPEX (US\$)	182,000	407,000
OPEX (US\$/año)	12,000	15,000
Ingresos (US\$/año)	19,083	19,083
Flujo neto (US\$/año)	7,083	4,083
Payback simple (años)	25.7	99.7

Tabla 4-5: Flujo neto anual y período de recuperación simple (85,000 US\$/BTC)

En resumen, con un Antminer S19 Pro y un precio de Bitcoin de US\$ 85,000, ambos sistemas generan flujos netos anuales positivos, pero el *payback simple* supera los 20 años. El sistema *on-grid* alcanza aproximadamente 26 años, mientras que el híbrido casi 100 años, reflejando el impacto del costo del banco de baterías. Estos resultados indican que, para lograr viabilidad económica, sería necesario un aumento del precio de Bitcoin, un incremento en la producción o una reducción de los costos operativos.

4.6.2. Indicadores del caso optimista – Bitcoin a US\$ 150,000

Dado que el caso base presenta una rentabilidad limitada según el criterio de *payback simple*, se analiza un caso optimista considerando un precio de Bitcoin de US\$ 150,000, manteniendo la misma capacidad operativa de los diez equipos Antminer S19 Pro. La producción anual se mantiene en 0.2245 BTC/año. Los resultados se presentan en la Tabla 4-6.

Indicador	On-grid	Híbrido
CAPEX (US\$)	182,000	407,000
OPEX (US\$/año)	12,000	15,000
Ingresos (US\$/año)	33,675	33,675
Flujo neto (US\$/año)	21,675	18,675
Payback simple (años)	8.4	21.8

Tabla 4-6: Flujo neto anual y período de recuperación simple (150,000 US\$/BTC)

En este caso, el sistema *on-grid* alcanza un *payback simple* de 8.4 años, inferior a la vida útil del sistema, lo que indica una viabilidad económica favorable bajo condiciones de mercado optimistas. Por su parte, el sistema híbrido mejora su desempeño, aunque su período de recuperación continúa siendo superior a 20 años, por lo que su viabilidad dependería de un aumento sostenido del precio de Bitcoin por encima de US\$ 150,000. Cabe destacar que estos resultados no consideran el valor del dinero en el tiempo, por lo que deben complementarse con indicadores financieros descontados para una evaluación más completa.

4.6.3. Período de recuperación descontado (*payback descontado*)

El *payback descontado* es una extensión del *payback simple* que incorpora el valor temporal del dinero mediante una tasa de descuento. Este indicador permite estimar el tiempo requerido para recuperar la inversión inicial, considerando que los flujos de efectivo futuros tienen un menor valor presente.

En proyectos energéticos de largo plazo, como el sistema fotovoltaico propuesto, es común adoptar una tasa de descuento del 10 %, la cual refleja el costo de oportunidad del capital, la inflación y el riesgo financiero asociado al proyecto. Para este análisis se considera el caso optimista, con un precio de Bitcoin de US\$ 150,000 y un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica (*on-grid*).

El flujo neto anual descontado (FND) se calcula como:

$$FND_t = \frac{FC_t}{(1+r)^t}$$

donde:

FC_t = flujo neto anual del año t (US\$ 21,675)

r = tasa de descuento (10 %)

t = año de análisis (1, 2, ..., 20)

Ejemplo de cálculo para los primeros dos años:

$$\text{Año 1:} \quad FND_1 = \frac{21,675}{(1+0.10)^1} = \frac{21,675}{1.10} \approx \text{US\$ } 19,705$$

$$\text{Año 2:} \quad FND_2 = \frac{21,675}{(1+0.10)^2} = \frac{21,675}{1.21} \approx \text{US\$ } 17,913$$

Este procedimiento se repite para los 20 años de vida útil del sistema. Sin embargo, para simplificar el análisis y observar la evolución del flujo neto descontado, se asume un flujo neto anual constante de US\$ 21,675 durante todo el período de evaluación, obteniéndose los valores que se presentan en la Tabla 4-7.

Año	Ingreso Bruto (US\$)	OPEX (US\$)	Flujo Neto Anual (US\$)	Flujo Neto Descontado (US\$)
0	0	0	-182,000	-182,000
1	33,675	12,000	21,675	19,705
2	33,675	12,000	21,675	17,913
3	33,675	12,000	21,675	16,285
4	33,675	12,000	21,675	14,804
5	33,675	12,000	21,675	13,458
6	33,675	12,000	21,675	12,235
7	33,675	12,000	21,675	11,123
8	33,675	12,000	21,675	10,112
9	33,675	12,000	21,675	9,192
10	33,675	12,000	21,675	8,357
11	33,675	12,000	21,675	7,597
12	33,675	12,000	21,675	6,906
13	33,675	12,000	21,675	6,278
14	33,675	12,000	21,675	5,708
15	33,675	12,000	21,675	5,189
16	33,675	12,000	21,675	4,717
17	33,675	12,000	21,675	4,288
18	33,675	12,000	21,675	3,898
19	33,675	12,000	21,675	3,544
20	33,675	12,000	21,675	3,222
			VP	US\$ 184,531

Tabla 4-7. Flujo neto anual y valor presente (VP)

La suma de los flujos netos descontados a lo largo de los 20 años corresponde al Valor Presente (VP) del proyecto:

$$VP = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=1}^{20} \frac{21,675}{(1+0.10)^t} = \sum_{t=1}^{20} FND_t = US\$ 184,531$$

Este análisis indica que, aunque el flujo neto anual es positivo (US\$ 21,675), la aplicación de la tasa de descuento del 10 % reduce su valor económico a lo largo del tiempo. El VP refleja que los flujos de caja futuros decrecen progresivamente; por ejemplo, el flujo descontado del año 9 es aproximadamente la mitad del flujo del año 1. Por lo tanto, la actualización de los flujos a valor presente durante los 20 años de vida útil constituye una herramienta fundamental para evaluar con mayor precisión la rentabilidad financiera del proyecto.

4.6.4. Valor Presente Neto (VPN)

El Valor Presente Neto (VPN) es un indicador financiero que permite evaluar la rentabilidad de un proyecto al comparar el valor presente de los flujos de efectivo futuros generados por el sistema con la inversión inicial. Este indicador permite determinar si el proyecto genera o no valor económico. Un VPN mayor que cero indica que el proyecto es económicamente rentable, al generar un excedente por encima del costo del capital invertido.

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} - I_0 = VP - I_0$$

Para el sistema fotovoltaico *on-grid*, con Antminer S19 Pro y un precio de Bitcoin de US\$ 150,000:

$$VPN = \sum_{t=1}^{20} \frac{21,675}{(1+0.10)^t} - I_0 = 184,531 - 182,000 = US\$ 2,531$$

El análisis del Valor Presente Neto (VPN) indica que el proyecto fotovoltaico *on-grid* es económicamente viable bajo el caso optimista, al presentar un valor positivo de US\$ 2,531. Sin embargo, el margen es reducido en comparación con la inversión inicial, lo que evidencia que el proyecto se encuentra cercano al punto de equilibrio y su rentabilidad es sensible a variaciones en los flujos de caja, la tasa de descuento y el precio del Bitcoin.

4.6.5. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es un indicador financiero que representa la tasa de descuento a la cual el Valor Presente Neto (VPN) de un proyecto se iguala a cero, expresando la rentabilidad porcentual anual promedio de los flujos netos de efectivo generados durante la vida útil del sistema.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - I_0$$

Para este estudio, bajo el escenario del sistema fotovoltaico *on-grid* y considerando el caso optimista con un precio de Bitcoin de US\$ 150,000, un flujo neto anual constante de US\$ 21,675 y un horizonte de evaluación de 20 años, la TIR se calcula mediante métodos iterativos, ajustando la tasa de descuento hasta que el Valor Presente Neto (VPN) sea igual a cero:

$$0 = \sum_{t=1}^{20} \frac{21,675}{(1 + TIR)^t} - 182,000$$

El resultado que se obtiene es:

$$TIR \approx 10.2 \%$$

Este valor se encuentra apenas por encima de la tasa de descuento del 10 % utilizada en el análisis financiero, lo que indica que el proyecto cubre el costo de oportunidad del capital y presenta una rentabilidad marginal bajo el caso optimista evaluado. En consecuencia, el sistema fotovoltaico para minería de Bitcoin resulta financieramente viable en condiciones favorables, aunque con un margen de rentabilidad limitado.

La TIR obtenida, cercana a la tasa de descuento, evidencia que cualquier variación significativa en los flujos de caja, el precio de Bitcoin, los costos operativos o la inversión inicial podría afectar la rentabilidad del proyecto. Este resultado subraya la importancia de considerar distintos escenarios de operación para evaluar cómo dichas variaciones pueden influir en la viabilidad financiera del sistema fotovoltaico aplicado a la minería de criptomonedas.

4.7. Evaluación económica del sistema utilizando equipos Antminer S21 Pro

Con el objetivo de analizar el impacto de equipos de minería más eficientes en la rentabilidad del proyecto, se evalúa un caso adicional considerando el uso de diez equipos Antminer S21 Pro. Esta nueva

generación de ASIC ofrece el doble de potencia de cómputo y producción de Bitcoin en comparación con modelos anteriores, como el Antminer S19 Pro, previamente analizado.

En este caso, cada Antminer S21 Pro consume aproximadamente 3.5 kW, al igual que los modelos Antminer S19 Pro, lo que mantiene la demanda energética total cercana a 45 kW. Por esta razón, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico desarrollado previamente continúa siendo adecuado, sin requerir ajustes adicionales.

Cada equipo Antminer S21 Pro produce en promedio 0.00010965 BTC por día. Para diez equipos, la producción anual estimada es:

$$\text{Producción anual} = 0.00010965 \times 10 \times 365 \approx 0.4002 \text{ BTC/año}$$

Bajo el caso optimista considerado en este estudio, con un precio de Bitcoin de US\$ 150,000, los ingresos anuales del sistema se estiman en:

$$\text{Ingresos anuales} = 0.4002 \times 150,000 \approx 60,033 \text{ US$/año}$$

En cuanto a los costos del proyecto solar fotovoltaico, estos se mantienen constantes según el análisis previo. Por lo anterior, la Tabla 4-8 presenta la comparación de los principales indicadores financieros entre los escenarios evaluados con equipos Antminer S19 Pro y Antminer S21 Pro, considerando un precio de Bitcoin de US\$ 150,000.

Escenario	CAPEX (US\$)	OPEX anual (US\$)	Ingresos anuales (US\$)	Flujo neto anual (US\$)	Payback simple (años)
On-grid (S19 Pro)	182,000	12,000	33,675	21,675	8.4
Híbrido (S19 Pro)	407,000	15,000	33,675	18,675	21.8
On-grid (S21 Pro)	182,000	12,000	60,033	48,033	3.8
Híbrido (S21 Pro)	407,000	15,000	60,033	45,033	9.0

Tabla 4-8. Comparación de indicadores financieros entre equipos Antminer S19 Pro y Antminer S21 Pro

Los resultados mostrados en la Tabla 4-7 evidencian que la incorporación de equipos de minería más eficientes incrementa de forma significativa el flujo neto anual del proyecto. En particular, el sistema *on-grid* con equipos Antminer S21 Pro reduce el *período de recuperación simple* de la inversión a 3.8 años, lo que representa una mejora sustancial en comparación con el escenario basado en equipos Antminer S19 Pro, donde el *payback simple* se estima en 8.4 años.

Para complementar el análisis financiero de este caso adicional, se calcularon indicadores que consideran el valor del dinero en el tiempo, empleando una tasa de descuento del 10 % y un horizonte de evaluación de 20 años. Los resultados del Costo Nivelado de Electricidad (LCOE), el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) se presentan en la Tabla 4-9.

Escenario	LCOE (US\$/kWh)	VPN (US\$)	TIR (%)
On-grid (S19 Pro)	0.053	2,531	10.2
Híbrido (S19 Pro)	0.088	-248,009	< 0.0
On-grid (S21 Pro)	0.053	226,906	26.1
Híbrido (S21 Pro)	0.088	-23,634	9.1

Tabla 4-9. Indicadores energéticos y financieros de los escenarios evaluados: LCOE, VPN y TIR

Los indicadores anteriores muestran que el sistema *on-grid*, operando con equipos Antminer S21 Pro, presenta el mejor desempeño económico, alcanzando un Valor Presente Neto (VPN) de US\$ 226,906 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 26.1 %, superando ampliamente la tasa de descuento del 10 %. Esto confirma su viabilidad económica bajo las condiciones evaluadas. El sistema fotovoltaico conectado a la red (*on-grid*) se consolida como la alternativa más eficiente, al evitar los costos asociados al banco de baterías y mantener una estructura de inversión optimizada.

El análisis comparativo entre distintas generaciones de equipos ASIC demuestra que la evolución tecnológica del hardware de minería impacta de manera significativa en la rentabilidad del proyecto. En este contexto, futuros estudios podrían profundizar en la viabilidad financiera de sistemas de minería alimentados con energía renovable, incorporando equipos de última generación y considerando simultáneamente la variabilidad del precio de Bitcoin como uno de los factores más determinantes en la rentabilidad de este tipo de proyectos. Esto implicaría la modelación de flujos de caja no constantes, dependientes de escenarios de mercado.

4.8. Conclusiones del análisis técnico-económico

El estudio indica que una operación de minería de Bitcoin con una demanda continua de 45 kW y un consumo anual cercano a 400,000 kWh requiere una planta solar fotovoltaica de aproximadamente 250 kWp, correspondiente a una instalación de mediana escala. La producción específica y el factor de capacidad estimados se encuentran dentro de los rangos esperados para la zona de estudio, lo que sugiere la viabilidad técnica preliminar del diseño bajo las condiciones analizadas.

El Costo Nivelado de Electricidad (LCOE) del sistema *on-grid*, estimado en 0.053 US\$/kWh, resulta inferior al costo promedio de la electricidad de la red, lo que sugiere competitividad económica frente al suministro convencional en El Salvador.

Desde el punto de vista económico, los resultados muestran que la rentabilidad del proyecto depende principalmente del precio del Bitcoin, la eficiencia de los equipos ASIC y el costo asociado al banco de baterías. En el escenario optimista con equipos Antminer S19 Pro, la configuración conectada a la red (*on-grid*) presenta un desempeño económico superior a la configuración híbrida, ya que la incorporación de almacenamiento energético incrementa significativamente los costos del sistema y prolonga el periodo de recuperación de la inversión más allá del horizonte de evaluación considerado.

El análisis con equipos de minería más eficientes, como el Antminer S21 Pro, evidencia que la evolución tecnológica del hardware tiene un impacto determinante en la viabilidad financiera del proyecto. En este caso, el sistema *on-grid* presenta un Valor Presente Neto (VPN) positivo y una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior a la tasa de descuento, lo que indica una rentabilidad favorable bajo condiciones de mercado optimistas.

En términos generales, el sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica (*on-grid*) se consolida como la alternativa económicamente más conveniente para la implementación de operaciones de minería de Bitcoin alimentadas con energía solar fotovoltaica, al permitir aprovechar la generación renovable sin incurrir en los elevados costos asociados al almacenamiento en baterías. No obstante, los sistemas híbridos pueden ofrecer ventajas operativas en términos de autonomía y seguridad energética, aunque con un incremento significativo en la inversión inicial y los costos operativos.

Finalmente, el estudio evidencia que la viabilidad de este tipo de proyectos está fuertemente condicionada por factores tecnológicos y de mercado, destacando la eficiencia del hardware de minería y la volatilidad del precio del Bitcoin como elementos determinantes en la rentabilidad del sistema.

CONCLUSIONES

- El presente estudio de caso, aplicado a un sistema de minería de Bitcoin en El Salvador, confirma que la operación basada en el algoritmo de consenso *Proof of Work* requiere una demanda energética elevada y continua, por lo que el costo de la electricidad constituye el principal factor que condiciona su viabilidad económica. En consecuencia, las tarifas eléctricas impactan directamente en la rentabilidad y en el período de recuperación de la inversión.
- Las mediciones realizadas al Antminer S19 Pro evidenciaron un consumo eléctrico cercano a su potencia nominal, aproximadamente 3.5 kW por equipo. La proyección de diez equipos operando de forma continua alcanza los 306.6 MWh anuales, equivalente al consumo de más de 250 hogares con demandas inferiores a 99 kWh mensuales. Estos resultados demuestran que, incluso a pequeña o mediana escala, la minería de Bitcoin representa una carga significativa para la red eléctrica.
- El análisis financiero evidencia que la rentabilidad del proyecto depende principalmente del precio de Bitcoin, la eficiencia de los equipos ASIC y los costos asociados al almacenamiento energético. Con sistemas *on-grid* y un precio de Bitcoin de US\$ 150,000, los equipos Antminer S19 Pro y S21 Pro son viables financieramente, con VPN positivo y TIR superior a la tasa de descuento. En contraste, los sistemas híbridos muestran indicadores financieros desfavorables, lo que incrementa el período de recuperación de la inversión.
- El dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico confirma la viabilidad técnica de cubrir la demanda energética mediante sistemas fotovoltaicos conectados a la red o híbridos, siendo la primera opción la más conveniente. La generación solar fotovoltaica reduce la dependencia de la tarifa eléctrica y estabiliza los costos operativos; sin embargo, con precios de Bitcoin más realistas y utilizando equipos S19 Pro, los ingresos generados por la minería no son suficientes para financiar completamente la inversión fotovoltaica.
- En términos generales, la minería de Bitcoin en El Salvador requiere un enfoque integral que considere múltiples variables energéticas, tecnológicas, económicas y regulatorias. Factores como el precio de la electricidad, la eficiencia del hardware, la volatilidad del precio de Bitcoin y la *dificultad de la red* influyen directamente en la rentabilidad del proyecto. Además, la incorporación de generación fotovoltaica y el uso de equipos ASIC más eficientes contribuyen a reducir costos operativos y mejorar el desempeño energético y financiero del sistema.

RECOMENDACIONES

- Priorizar sistemas fotovoltaicos conectados a la red (*on-grid*) para proyectos de minería de Bitcoin de pequeña y mediana escala, ya que presentan menor complejidad técnica y menores costos de inversión en comparación con sistemas híbridos. La eliminación de bancos de baterías reduce significativamente los costos CAPEX y OPEX, evitando gastos asociados a su degradación y reposición, sin comprometer la continuidad operativa gracias al respaldo de la red eléctrica.
- Ajustar el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico al perfil real de consumo de los equipos ASIC y de las cargas auxiliares, así como a la curva de generación solar de la zona de instalación. Esto permite maximizar el autoconsumo instantáneo, reducir excedentes no compensados y evitar sobredimensionamientos que incrementen innecesariamente la inversión inicial.
- Incorporar equipos de minería más eficientes, como el Antminer S21 Pro, que ofrece aproximadamente el doble de *tasa de hash* que el Antminer S19 Pro con un consumo similar. Esta mejora tecnológica aumenta la productividad por unidad de energía consumida, reduce el costo relativo por Bitcoin minado y mejora el margen operativo frente a la volatilidad del precio del Bitcoin y la *dificultad de la red*.
- Evaluar alternativas financieras y regulatorias que optimicen la rentabilidad del proyecto, como incentivos fiscales para energías renovables, tarifas eléctricas preferenciales, contratos de compraventa de energía (*PPA, Power Purchase Agreement*) o mecanismos de facturación neta (*net billing*). En este último caso, cuando la energía inyectada y consumida presentan un balance cercano al equilibrio, la *facturación neta* puede reducir significativamente el costo energético efectivo del proyecto.
- Complementar el análisis con estudios de sensibilidad multivariable que consideren variaciones simultáneas en el precio de Bitcoin, la *dificultad de la red*, los costos del sistema fotovoltaico, la tasa de descuento y la escala de operación. Este enfoque permite evaluar escenarios más robustos frente a la incertidumbre del mercado y analizar con mayor precisión el impacto de las economías de escala en proyectos de mayor capacidad.
- Implementar estrategias adecuadas de ventilación y gestión térmica en los equipos ASIC, con el fin de mantener condiciones óptimas de operación, reducir pérdidas de eficiencia y prolongar la vida útil del hardware.

REFERENCIAS

- AES El Salvador (s.f.) *Guía sectorial - Energía*. Gob.sv. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://investinelsalvador.gob.sv/wp-content/uploads/2023/12/Guia-Sectorial-Energia-2023.pdf>
- Agencia A. F. P. (2021, octubre 15). *Así luce la planta geotérmica que mina bitcoin en El Salvador* | Noticias de El Salvador. <https://historico.elsalvador.com/historico/890151/planta-geotermica-bitcoin-mineria.html>
- Alemán, M. (2021, octubre 15). El Salvador usa energía geotérmica para operación de bitcoin. AP News. <https://apnews.com/article/noticias-d26e5b1eaa7bcd5afd3e64e041c73006>
- Alemán, U. (2025, enero 22). La demanda de energía creció 4.3 % en 2024: hidro y gas natural fueron los mayores generadores. Diario El Mundo. <https://diario.elmundo.sv/economia/la-demanda-de-energia-crecio-43-en-2024-hidro-y-gas-natural-fueron-los-mayores-generadores>
- Alvarado, M. (2024, junio 17). El Bitcoin sigue siendo un escollo para un acuerdo con el FMI. Noticias de El Salvador. <https://www.elsalvador.com/noticias/negocios/el-salvador-felix-ulloa-bitcoin-fmi-nayib-bukele/1149525/2024/>
- Alvarado, M. (2025, mayo 13). Las mentiras que rodean los proyectos de minería Bitcoin en El Salvador. El Diario de Hoy. <https://www.elsalvador.com/h-noticias/h-negocios/bitcoin-el-salvador-nayib-bukele-criptomonedas/1218619/2025/>
- Anastasia. (2025, marzo 11). Los mejores inversores solares: Una guía para elegir el adecuado para sus sistemas - JOEYOUNG. JoeYoung Solar Inverter Fabricantes. <https://www.solarinvertermanufacturers.com/es/best-solar-inverters/>
- Antonopoulos, A. M. (2017). *Mastering Bitcoin: Unlocking digital cryptocurrencies* (2nd ed.). O'Reilly Media.
- ASICMinerValue (s.f.). Bitmain Antminer S19 Pro (110Th). ASIC Miner Value. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://www.asicminervalue.com/es/miners/bitmain/antminer-s19-pro-110th>
- AutoSolar (s.f.). Batería GEL 12V 250Ah Tensite. Recuperado el 31 de diciembre de 2025, de <https://autosolar.es/baterias-gel-12v/bateria-gel-12v-250ah-tensite>

- Banco Central de Reserva (2022, enero 21). El Salvador recibió US\$7,517.1 millones en remesas familiares durante 2021. Gob.sv. Recuperado el 31 de enero de 2025, de <https://www.bcr.gob.sv/2022/01/21/el-salvador-recibio-us7517-1-millones-en-remesas-familiares-durante-2021/>
- BBC News Mundo (2021, febrero 8). Bitcoin: por qué Tesla invirtió US\$1.500 millones en la criptomoneda (y cómo esto puede marcar su futuro). <https://www.bbc.com/mundo/noticias-55988372>
- Bech, M., & Garratt, R. (2017). Criptomonedas de bancos centrales. Informe Trimestral Del PBI, 101. https://www.cemla.org/PDF/boletin/PUB_BOL_LXIV-01-03.pdf
- Binance (2024). ¿Cuándo ocurrirá el siguiente halving de Bitcoin? Binance. <https://www.binance.com/es/events/bitcoin-halving>
- Bit2Me Academy (2019, junio 7). ¿Qué es una pool de minería de criptomonedas? Bit2Me Academy. <https://academy.bit2me.com/que-es-pool-mineria-criptomonedas/>
- Bitcoin (s.f.) Choose your wallet. Recuperado el 31 de enero de 2025, de <https://bitcoin.org/en/choose-your-wallet>
- Bitcoin Magazine (2022, agosto 12). How SHA256 And Mining Protect The Bitcoin Network. Bitcoin Magazine. <https://bitcoinmagazine.com/technical/how-mining-protects-the-bitcoin-network>
- Bitcoin Mining Insights (s.f.). Todo lo que necesitas saber sobre la minería de criptomonedas en 2021. Recuperado el 15 de abril de 2025, de <https://www.bitcoinmininginsights.com/mineria-de-criptomonedas>
- Bitcoin Store (s.f.) ¿Qué es el Proof-of-Work? ¿Cómo funciona el algoritmo de consenso de Bitcoin? Recuperado el 31 de enero de 2025, de <https://www.bitstore.net/es/blog/que-es-el-proof-of-work/>
- BitcoinWiki (s.f.) Mining: the technical part. Recuperado el 15 de abril de 2025, de <https://bitcoinwiki.org/wiki/mining-the-technical-part>
- Bitmain (2020, febrero 27) Bitmain.com. S19 Pro Specifications. Recuperado el 15 de abril de 2025, de <https://support.bitmain.com/hc/en-us/articles/900000261726-S19-Pro-Specifications>
- Bitmain (2024, abril 17) Bitmain.com. S21 Pro Specifications. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://support.bitmain.com/hc/en-us/articles/31321354157593-S21-Pro-Specification>

- Bitpanda (2019a, febrero 7). ¿Qué es el doble gasto y por qué supone un problema? Bitpanda.com; Bitpanda. <https://www.bitpanda.com/academy/es/lecciones/que-es-el-doble-gasto-y-por-que-supone-un-problema/>
- Bitpanda (2019b, febrero 16). ¿Qué es la “minería de Bitcoin” y cómo funciona la minería? Bitpanda.com; Bitpanda. <https://www.bitpanda.com/academy/es/lecciones/que-es-la-mineria-de-bitcoin-y-como-funciona-la-mineria/>
- Blockchain (s.f.). Blockchain.com | Charts - Network Difficulty. Blockchain.com. Recuperado el 15 de abril de 2025, de <https://www.blockchain.com/explorer/charts/difficulty>
- Bonneau, J., Miller, A., Narayanan, A., Bonneau, J., Miller, A., & Narayanan, A. (2015). SoK: Research perspectives and challenges for Bitcoin and cryptocurrencies. Proceedings of the 2015 IEEE Symposium on Security and Privacy, 1-17. <https://doi.org/10.1109/SP.2015.14>
- Braiins Pool (s.f.). Braiins Pool. Braiins.com. Recuperado el 15 de abril de 2025, de <https://es.braiins.com/pool>
- Cambridge Blockchain Network Sustainability Index (s.f.). Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). Ccaf.io. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci>
- Chamanara, S., Ghaffarizadeh, S. A., & Madani, K. (2023, octubre 24). The Environmental Footprint of Bitcoin Mining Across the Globe: Call for Urgent Action. *Earth's Future*, 11(10). <https://doi.org/10.1029/2023ef003871>
- Chivo Wallet (s.f.). Inicio. Chivo Wallet. Recuperado el 31 de enero de 2025, de <https://www.chivowallet.com/index.html>
- CNE (2019, septiembre). Consumo del recurso energético de acuerdo a características de los distintos usos en el sector residencial. Gob.sv. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de https://estadisticas.dgehm.gob.sv/wp-content/uploads/2019/09/Estudio-de-caracterizaci%C3%B3n-de-cargas-el%C3%A9ctricas-en-sector-residencial_Marzo.pdf
- CoinSurges (2025, enero 28). Foundry mined over a third of all Bitcoin blocks in the past week. Coinsurges.com; Coin Surges. <https://www.coinsurges.com/foundry-mined-over-a-third-of-all-bitcoin-blocks-in-the-past-week>
- Cole, J. (2024, diciembre 5). Staking in crypto: How PoS reduces energy consumption. BlockApps Inc. <https://blockapps.net/blog/staking-in-crypto-how-pos-reduces-energy-consumption/>

- Colomer, R. (2022, octubre 4). Los mejores software de minería de Bitcoin. Lemming at Work.
<https://www.lemmingatwork.com/inversiones/criptomonedas/mejores-software-mineria-bitcoin/>
- Croman, K., Eyal, I., & Sirer, E. G. (2016). On Scaling Decentralized Blockchains. In Proceedings of the 3rd Workshop on Bitcoin and Blockchain Research (pp. 106–125). ACM.
<https://doi.org/10.1145/2993669.2993678>
- CryptoMinerBros (2024, diciembre). Solo Mining Vs Pooled Mining: Which is Better?
<https://www.cryptominerbros.com/es/blog/solo-mining-vs-pooled-mining/>
- Dance, G. J. X. (2023, abril 9). The Real-World Costs of the Digital Race for Bitcoin. The New York Times. <https://www.nytimes.com/2023/04/09/business/bitcoin-mining-electricity-pollution.html>
- D-Central Technologies (2023, junio 22). D-Central technologies – Canada’s top Bitcoin mining solutions. D-Central; D-Central Technologies. <https://d-central.tech>
- DGEHM (2024). Capacidad Instalada. Estadísticas - Dirección General de Energía, Hidrocarburos y Minas. <https://estadisticas.dgehm.gob.sv/capacidad-instalada/>
- Digiconomist (2024, noviembre 26). Bitcoin Energy Consumption Index. Digiconomist.
<https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>
- Dirección General de Estadísticas y Geografía de El Salvador (2024, agosto 1). Plan Indicativo de la Expansión de la Generación Nacional 2024-2038. <https://estadisticas.dgehm.gob.sv/wp-content/uploads/2025/03/PIEG-2024-2038.pdf>
- Domingo, C. A. R. L. O. S. (2018). Bitcoin, criptomonedas y blockchain. Mexico: Ediciones Temas de Hoy.
https://pladlibroscl0.cdnstatics.com/libros_contenido_extra/38/37925_Bitcoin_Criptomonedas_Y_Blockchain.pdf
- EIA (2019, junio 12). Southwestern states have better solar resources and higher solar PV capacity factors - U.S. Energy Information Administration (EIA). Recuperado el 31 de diciembre de 2025, de <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=39832>

- El Economista (2022, junio 30). Un 36 % de salvadoreños tiene cuenta bancaria. Eleconomista.net. Recuperado el 31 de mayo de 2025, de <https://www.eleconomista.net/economia/Un-36--de-salvadorenos-tiene-cuenta-bancaria-20220630-0003.html>
- El Faro (2022, febrero 8) Primer minero salvadoreño de bitcoin: “buscamos electricidad más barata”. Elfaro.net. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de https://elfaro.net/es/202202/el_salvador/25983/Primer-minero-salvadore%C3%B1o-de-bitcoin-%E2%80%9Cbuscamos-electricidad-m%C3%A1s-barata%E2%80%9D.htm
- El Faro (2025, enero 30) Bukelismo puede reformar la Constitución sin límites y elimina Bitcoin como moneda. Elfaro.net. Recuperado el 31 de enero de 2025, de https://elfaro.net/es/202501/el_salvador/27723/asamblea-se-otorga-poder-para-reformar-la-constitucion-sin-limites-y-elimina-bitcoin-como-moneda
- Enlight (2021, octubre 19). Baterías para paneles solares: Qué son, para qué sirven y cuánto cuestan. Enlight.mx. <https://www.enlight.mx/blog/baterias-para-paneles-solares-que-son-para-que-sirven-y-cuanto-cuestan>
- Euronews (2024, octubre 22). El bitcoin roza máximos ante la perspectiva de que Trump gane las elecciones en EE.UU. Euronews. <https://es.euronews.com/business/2024/10/22/el-bitcoin-roza-maximos-ante-la-perspectiva-de-que-trump-gane-las-elecciones-en-eeuu>
- Flir Systems (s.f.). FLIR i7 infrared camera datasheet. Global Test Supply. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de https://www.globaltestsupply.com/pdfs/cache/www.globaltestsupply.com/flir_systems/thermal_imager/i7/datasheet/flir_systems_i7_thermal_imager_datasheet.pdf
- Fluke (s.f.) Analizadores de calidad eléctrica y energía 434-II y 435-II de Fluke. Fluke.com. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://www.fluke.com/es-sv/producto/comprobacion-electrica/calidad-electrica/434-435>
- GlobalPetrolPrices.com (s.f.-a). Islandia precios de la electricidad, diciembre 2024. GlobalPetrolPrices.com. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de https://www.globalpetrolprices.com/Iceland/electricity_prices/
- GlobalPetrolPrices.com (s.f.-b). Precios de la electricidad en todo el mundo. GlobalPetrolPrices.com. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de https://es.globalpetrolprices.com/electricity_prices/

- Gomez, J. L. R. (2020). Bitcoin, un activo de inversión alternativo | Bitcoin, an alternative investment asset. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28801.68968>
- Holcim El Salvador (2022, febrero 2). Holcim producirá cemento a partir de energía solar. (2022, febrero 2). Soluciones de construcción innovadoras y sostenibles. <https://www.holcim.com.sv/holcim-producira-cemento-a-partir-de-energia-solar-0>
- IBM (2025, enero 23). ¿Qué es una matriz de puertas programables en campo? [ibm.com](https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/field-programmable-gate-arrays). <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/field-programmable-gate-arrays>
- Ineldec (s.f.). Inversor híbrido 12kW 48V Fase Dividida Deye. Recuperado el 31 de diciembre de 2025, de <https://ineldec.com/producto/inversor-hibrido-12kw-48v-fase-dividida-deye/>
- INFOBAE (2021, junio 5). Nayib Bukele anunció que impulsará una legislación para que El Salvador sea el primer país del mundo en legalizar el bitcoin. [infobae](https://www.infobae.com/america/america-latina/2021/06/05/nayib-bukele-anuncio-que-impulsara-una-legislacion-para-que-el-salvador-sea-el-primer-pais-del-mundo-en-legalizar-el-bitcoin/). <https://www.infobae.com/america/america-latina/2021/06/05/nayib-bukele-anuncio-que-impulsara-una-legislacion-para-que-el-salvador-sea-el-primer-pais-del-mundo-en-legalizar-el-bitcoin/>
- Intendencia Económica (s.f.) Evolucion del precio del servicio de energía electrica en El Salvador. [Gov.sv](https://www.sc.gob.sv/wp-content/uploads/Monitoreos_IE/Monitoreo%20-%20Evoluci%C3%B3n%20de%20precios%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica%20en%20El%20Salvador.pdf). Recuperado el 15 de agosto de 2025, de https://www.sc.gob.sv/wp-content/uploads/Monitoreos_IE/Monitoreo%20-%20Evoluci%C3%B3n%20de%20precios%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica%20en%20El%20Salvador.pdf
- InvestinElSalvador (2023, julio 4). Guía Sectorial – Energía 2023. InvestinElSalvador - the best place to invest, visit and live; InvestinElSalvador. <https://investinelsalvador.gob.sv/es/download/guia-sectorial-energia-2023/>
- IRENA (2022). Hoja de ruta de energías renovables para Centroamérica: hacia una transición energética regional. <https://www.irena.org/Publications/2022/Mar/Renewable-Energy-Roadmap-for-Central-America-ES>
- IRENA (2024). Investment opportunities for utility-scale solar and wind areas: El Salvador, International. Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/Publications/2024/May/Investment-opportunities-for-utility-scale-solar-and-wind-areas-El-Salvador>

- Jurisprudencia (s.f.). DECRETO N° 57. Gob.sv. Recuperado el 31 de enero de 2025, de <https://www.jurisprudencia.gob.sv/DocumentosBoveda/D/2/2020-2029/2021/06/E75F3.PDF>
- Kriptomat (2025). Bitcoin mining: How it works. <https://kriptomat.io>
- Latinmedia (2024, mayo 17). El Salvador Minó Casi 474 BTC Usando Energía Geotérmica. Centroamérica & Caribe IT. <https://www.centroamericaycaribeit.com/20519/el-salvador-mino-casi-474-btc-usando-energia-geotermica/>
- LaudeMMedia (s.f.) Mining rig 6 GPU NVIDIA 3080 NO LHR. Recuperado el 15 de abril de 2025, de https://www.laudemmedia.com/tienda/mining-rig-6-gpu-nvidia-3080-no-lhr/?utm_source=cha
- Lincoln, D., & Partner, L. G. (2024, noviembre 2). The World's Top 10 Crypto-Friendly Countries & How to Get Residency or Citizenship There. Lincoln Global Partners. <https://www.lincolnglobalpartners.com/2024/11/04/the-worlds-top-10-crypto-friendly-countries-how-to-get-residency-or-citizenship-there/>
- MARN (s. f.). Volcanes Activos. Recuperado el 15 de abril de 2025, de <https://www.snet.gob.sv/ver/vulcanologia/volcanes+de+el+salvador/volcanes+activos/>
- Miah, S. (2025, mayo 20). 10 Countries that Mine Most BTC. Webopedia.com. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://www.webopedia.com/crypto/learn/10-countries-that-mine-most-btc/>
- Minasian-Koncewicz, S. (2025, junio 4). U.S. electricity rates by state: A comprehensive analysis (2025). This Old House. <https://www.thisoldhouse.com/electricity/electricity-rates-by-state>
- Molina, K. (2024, enero 22). Generación de energía solar en El Salvador crece más del 300 % en seis años. La Prensa Gráfica. <https://www.laprensagrafica.com/economia/Generacion-de-energia-solar-crece-mas-del-300--en-seis-anos-20240121-0052.html>
- Moreno, B., Valencia, N., Soto, F., & Sánchez, A. (2018). Criptomonedas como alternativa de inversión, riesgos, regulación y posibilidad de monetización en Colombia. <http://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/4746>
- MUNDIARIO (2024, septiembre 23). Bitcoin: la fiebre del oro digital del siglo XXI. MUNDIARIO. <https://www.mundiario.com/articulo/economia/Bitcoin-fiebre-oro-digital/20240923121832318565.html>

- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- National Air Warehouse (s.f.). Glossary - SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio). National Air Warehouse. <https://nationalairwarehouse.com/glossary-seer/>
- Navarro Cardoso, F. C. (2019). Criptomonedas (en especial, bitcóin) y blanqueo de dinero. Revista electrónica de ciencia penal y criminología. <https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/74463>
- NiceHash (s.f.). Calculadora de rentabilidad. Nicehash.com. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://www.nicehash.com/profitability-calculator/bitmain-antminer-s19-pro/bitmain-antminer-s21-pro>
- Novas Carballo, A. (2023). Creación de una granja de minado de criptomonedas autónoma. <https://openaccess.uoc.edu/handle/10609/147210>
- OpenStreetMap (s.f.). Metapán, Santa Ana Norte, Santa Ana, El Salvador. OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/search?query=14.33503%2C-89.50655&zoom=12&minlon=-89.6038055419922&minlat=14.229442912497907&maxlon=-89.25498962402344&maxlat=14.425037944474694#map=12/14.3350/-89.5066>
- Ortiz, T. (2024, octubre 15). El bitcóin no revolucionó el mundo de las remesas. Revista Factum. <https://www.revistafactum.com/bitcoin-remesas/>
- Quintero, J. Z., Ord n ez, V. A., & Rodríguez, D. N. (2022). Diseño de modelo de exportación de energía con paneles solares para la minería de bitcoin. *Germina*, 5(5), 8-11. <https://cipres.sanmateo.edu.co/ojs/index.php/germina/article/view/879>
- Ratings PCR (2024, mayo). Sector eléctrico de El Salvador. Ratings PCR. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de https://informes.ratingspcr.com/Files/notas/el_salvador/1715265380/nota_de_prensa_pcr_202312.pdf
- Reuters (2024, Mayo 14) El Salvador mined nearly 474 bitcoins, adding to state crypto holding, in last three years. Recuperado el 15 de abril de 2025, de <https://www.reuters.com/world/americas/el-salvador-mined-nearly-474-bitcoins-adding-state-crypto-holding-last-three-2024-05-14/>
- Reuters.com (s.f.). Germany plans to cut energy costs by 42 billion euros, draft budget shows. Reuters.com. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de

<https://www.reuters.com/sustainability/germany-plans-cut-energy-costs-by-42-billion-euros-draft-budget-shows-2025-07-28/>

- Rivera, K. (2023, junio 11). El Salvador estará libre de deuda en 2030 con la minería bitcoin: Max Keiser, chairman de Volcano Energy. Diario el Salvador. <https://diarioelsalvador.com/el-salvador-tendra-el-proyecto-de-mineria-bitcoin-mas-grande-del-mundo-max-keiser-presidente-ejecutivo-de-volcano-energy/371241/>
- Rivera, K. (2024, abril 13). Volcano Energy comenzará a minar bitcoin en El Salvador en 2025. Diario el Salvador. <https://diarioelsalvador.com/volcano-energy-comenzara-a-minar-bitcoin-en-el-salvador-en-2025/489467/>
- RiverLearn (s.f.) Buying a bitcoin mining rig? What you need to know. RiverLearn. Recuperado el 15 de abril de 2025, de <https://river.com/learn/mining-rig/>
- Roa, M. M. (2021, mayo 6). Bitcoin consume más electricidad que países enteros. Statista. <https://es.statista.com/grafico/18630/consumo-de-electricidad-anual-de-bitcoin/>
- Schuschny, A. (2017). La blockchain y sus posibles aplicaciones en el ámbito de la energía. ENERLAC. Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe, 1(2), 60-79. <https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/24>
- Shevchenko, A. (2020, septiembre 25). Pruebas preliminares indican que Nvidia RTX serie 3000 podría robarle la corona a AMD. Cointelegraph. <https://es.cointelegraph.com/news/preliminary-tests-suggest-the-nvidia-rtx-3000-series-may-take-amd-s-crown-in-mining>
- Sidn, D. (2025, enero 28). La Potencia Pico en Fotovoltaica: Conceptos, diferencias y su importancia en el diseño de instalaciones. Vector Solar. <https://vectorsolar.es/blog/potencia-pico-fotovoltaica/>
- SIGET (s.f.-a). Gobierno de El Salvador garantizará la estabilidad de la tarifa de energía para el próximo trimestre. Gob.sv. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://www.siget.gob.sv/gobierno-de-el-salvador-garantizara-la-estabilidad-de-la-tarifa-de-energia-para-el-proximo-trimestre/>
- SIGET (s.f.-b). Tarifas de electricidad. Gob.sv. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://www.siget.gob.sv/gerencias/electricidad/tarifas-de-electricidad/>

- Sol Verde El Salvador (s.f.). Batería GEL 12V 250Ah YANGTZE. Recuperado el 31 de diciembre de 2025, de <https://solverde.sv/product/bateria-solar-de-250ah/>
- SolarGIS (s.f.-a). Global Solar Atlas. Globalsolaratlas.info. Recuperado el 31 de diciembre de 2025, de <https://globalsolaratlas.info/map?c=13.803408,-88.90686,8&r=SLV>
- SolarGIS (s.f.-b). Global Solar Atlas. Globalsolaratlas.info. Recuperado el 31 de diciembre de 2025, de <https://globalsolaratlas.info/map?c=14.33503,-89.50655,11&s=14.33503,-89.50655&m=site>
- Soluciones LED (2024, abril 23). Que factores influyen en la producción de tu instalación fotovoltaica? SOLED. <https://www.soled-solar.com/post/que-factores-influyen-en-la-produccion-de-tu-instalacion-fotovoltaica>
- Sotysolar (2023, agosto 17). Diferencia entre kW, kWp y kWh. Sotysolar.es. Recuperado el 31 de diciembre de 2025, de <https://sotysolar.es/blog/potencia-energia>
- Stacy Herbert (2024, diciembre 19). EL SALVADOR SECURES \$3.5 FUNDING DEAL. Twitter. <https://x.com/stacyherbert/status/1869752262186217868?>
- StatMuse (s.f.-a) Bitcoin average price 2025. statmuse.com. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://www.statmuse.com/money/ask/bitcoin-average-price-2025>
- StatMuse (s.f.-b) Bitcoin average price March 2025. statmuse.com. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://www.statmuse.com/money/ask/bitcoin-average-price-march-2025>
- SunFields Europe (2025a, mayo 2). Parámetros de paneles solares fotovoltaicos. SunFields | Expertos En Energía Fotovoltaica Para Ahorro Energético En España. <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/parametros/?srsltid=AfmBOoqhrDuYAZF6n5mPYjpAi8p1a5xmiysukxxCQB9ys-qtTHVGzobA>
- SunFields Europe. (2025b, septiembre 29). Funcionamiento de inversores fotovoltaicos | SunFields. SunFields | Expertos En Energía Fotovoltaica Para Ahorro Energético En España. <https://www.sfe-solar.com/inversores/funcionamiento/?srsltid=AfmBOorpEDxO6CiZMZvpLaQYXjnOMRFsZ2Egkzv8B9izaXOq4NaO3>
- Tritec Center (2017, agosto 18). TIPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS - Tritec Center. <https://tritec-center.cl/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>

Ubuy El Salvador (s.f.). Batería de litio de ciclo profundo Power Queen 12V El Salvador | Ubuy. Ubuy el Salvador. Recuperado el 31 de diciembre de 2025,

<https://www.ubuy.sv/es/product/4LQ5JCTZ8-power-queen-12v-200ah-plus-lifepo4-deep-cycle-lithium-battery-4000-cycles-with-200a-bms-for-rv-off-grid-system-solar?srsId=AfmBOoomE-oQe8fWRIJYmjYNYIS5o07Nin5DKYMtdh4CA05i4ISCaOXu>

Unidad de Transacciones (s.f.) Reportes estadísticos públicos. ut.com.sv. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de

https://www.ut.com.sv/reportes?p_p_id=MenuReportesEstadisticosPublicReports_WAR_PublicReports&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&_MenuReportesEstadisticosPublicReports_WAR_PublicReports_reportName=17utmdempreciosrms

ViaBTC (2022, julio 19). ¿Cómo elegir el mejor método de pago (PPS+, PPLNS, SOLO)? ViaBTC Support.

<https://support.viabtc.com/hc/es/articles/7207414833935--C%C3%B3mo-elegir-el-mejor-m%C3%A9todo-de-pago-PPS-PPLNS-SOLO>

Volcano Energy (2023, junio 5). Lanzan Volcano Energy, un proyecto de minería bitcóin en El Salvador con una inversión inicial de \$250 millones. Volcano Energy. <https://volcano.energy/lanzan-volcano-energy-un-proyecto-de-mineria-bitcoin-en-el-salvador-con-una-inversion-inicial-de-250-millones/>

Volcano Energy (2023, junio 5). Lanzan Volcano Energy, un proyecto de minería bitcóin en El Salvador con una inversión inicial de \$250 millones. Volcano Energy. <https://volcano.energy/lanzan-volcano-energy-un-proyecto-de-mineria-bitcoin-en-el-salvador-con-una-inversion-inicial-de-250-millones/>

Wang, G., Sbai, E., Wen, L., & Selena Sheng, M. (2024). The impact of renewable energy on extreme volatility in wholesale electricity prices: Evidence from organisation for economic co-operation and development countries. *Journal of Cleaner Production*, 484(144343), 144343. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144343>

Wega Energy (2023, marzo 22). ¿Cuál es la diferencia entre un sistema On Grid y Off Grid?. Wega Energy. <https://wega-energy.com/blog/diferencia-sistema-on-grid-off-grid/>

Wuxi SHANXU SOLAR (s.f). HiMO X6Max LR7-72HTDR 600-625W. Guanjitech.com. Recuperado el 31 de diciembre de 2025, de <https://www.guanjitech.com/longi-solar/HiMO-X6Max-LR7-72HTDR-600-625W.html>